

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

**Modely pro koordinaci
silně závislých světelných křižovatek**

Disertační práce

Studijní program:	P2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	2301V003 Dopravní technika a technologie
Školitel:	doc. RNDr. Štefan Peško, CSc.
Doktorand:	Ing. Michal Turek

Ostrava 2012

ANOTACE

TUREK, M. *Modely pro koordinaci silně závislých světelných křižovatek*. Ostrava: Institut dopravy, Fakulta strojní, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012, 106 s. Disertační práce, školitel: Peško, Š.

Disertační práce se zabývá navrhováním koordinace světelných křižovatek prostřednictvím Petriho sítí a matematického aparátu spektrální analýzy max-plus algebry. V úvodu je analyzována problematika koordinace světelných křižovatek a popsán současný stav jejího řešení v České republice a v zahraničí. Následuje modelování logiky řízení izolovaných světelných křižovatek v Petriho sítích a modelování koordinace vybraných silně závislých světelných křižovatek rovnicemi max-plus algebry. V rámci konkrétních návrhů jsou také popsány použité softwarové nástroje Snoopy, Pipe2 a Scilab. Na závěr je provedeno vyhodnocení jednotlivých počítačových experimentů, formulovány vyplývající doporučení pro praxi a shrnuty vědecké přínosy práce.

ANNOTATION

TUREK, M. *Models for strongly dependent crossroads coordination*. Ostrava: Institute of Transport, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB - Technical University Ostrava, 2012, 106 p. Dissertation thesis, adviser: Peško, Š.

The thesis deals with the coordination of traffic lights design by Petri nets and mathematical analysis of the spectral max-plus algebra. In the introduction it is analyzed the problem of coordination of traffic lights and describes the current state of its solution in the Czech Republic and abroad. The following control logic modeling isolated traffic lights in the Petri net modeling and coordination of selected traffic lights are heavily dependent equations max-plus algebra. The specific proposals are also described software tools used Snoopy, Pipe2 and Scilab. Finally, an evaluation of all computer experiments, resulting formulated recommendations for practice and summarizes the benefits of scientific work.

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou disertační práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením školitele a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....

.....

podpis studenta

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

c	délka cyklu [s]
δ	minimální doba, kterou potřebuje vozidlový proud pro vjezd do křižovatky, (volí se zpravidla 2 s) [s]
q_i	intenzita účastníků silničního provozu v i -tém vozidlovém proudu, kteří se ucházejí o vstup do křižovatky za hodinu
q_{ki}	intenzita účastníků silničního provozu v i -tém vozidlovém proudu, kteří se ucházejí o vstup do k -té křižovatky za hodinu
m_{ij}	mezičas, který musí uplynout mezi koncem vstupu i -tého proudu do křižovatky a začátkem vstupu j -tého proudu do křižovatky stanovený pro dvojice kolizních proudů [s]
m_{kij}	mezičas, který musí uplynout mezi koncem vstupu i -tého proudu do křižovatky a začátkem vstupu j -tého proudu do křižovatky stanovený pro dvojice kolizních proudů na k -té křižovatce [s]
$m_{P_i P_j}$	mezičas mezi koncem vstupu i -tého proudu do křižovatky a začátkem vstupu j -tého proudu do křižovatky, $P_i \in P$, $P_j \in P$
N_0	množina přirozených čísel
P	množina dopravních proudů $P = \{P_1, P_2, \dots, P_p\}$
F	množina fází $F = \{F_1, F_2, \dots, F_f\}$
S	množina křižovatek $S = \{S_1, S_2\}$
T	množina dvojic koordinovaných proudů $T \subseteq P \times P$,
τ	minimální doba zelené pro vozidlový proud (stanovená hodnota 5 s) [s]
TEG	Timed Event graphs
t_j	doba jízdy koordinovaným úsekem (v obou směrech) [s]
$t_{P_i}(k)$	doba zelené pro i -tý dopravní proud v k -té fázi, $P_i \in P$ [s]
t_v	vyklizovací doba koordinovaného úseku [s]
u	minimální poměrná rezerva mezi nabízenou a průměrně požadovanou dobou zelené
x_i	začátek zelené pro i -tý dopravní proud [s]
x_{ki}	začátek zelené pro i -tý dopravní proud na k -té křižovatce [s]

y_i konec zelené pro i -tý dopravní proud [s]

y_{ki} konec zelené pro i -tý dopravní proud na k -té křižovatce [s]

Z^+ množina celých kladných čísel

$z_{p_i}(k)$ začátek zelené pro i -tý dopravní proud v k -té fázi, $p_i \in P$ [s]

1. ÚVOD

Křižovatky představují na pozemních komunikacích místa, v nichž se setkává více dopravních proudů, které však nemohou do křižovatky vstupovat současně, protože určité dopravní proudy jsou vždy navzájem kolizní. Z uvedeného důvodu je nutné předpokládat, že na křižovatkách a v jejich okolí může docházet ke zpomalování nebo zastavování dopravních proudů a jedním z řešení snižující dopad uvedených negativních vlivů představuje světelné řízení křižovatek. Světelné řízení křižovatek musí prostřednictvím svého základního principu umožňovat současné jízdy pouze nekolizním, resp. podmíněně kolizním dopravním proudům a srozumitelně zobrazovat návěští včetně srozumitelného zobrazování změny návěští na návěstidlech světelného signalizačního zařízení, aby byla zajištěna bezpečnost provozu, a efektivně přiřazovat doby zelené jednotlivým dopravní proudům, aby byla zajištěna plynulost provozu.

Výše uvedený princip světelného řízení lze vhodně využít u křižovatek, které mezi sebou mají dostatečně velkou vzdálenost a lze je tak považovat za izolované, protože vstup dopravních proudů do křižovatky není bezprostředně ovlivňován výstupem dopravních proudů ze sousední křižovatky.

V případě, že se křižovatky nacházejí v malých vzdálenostech, je nutné základní princip světelného řízení rozšířit o koordinaci křižovatek, protože vstup dopravních proudů do jedné křižovatky je bezprostředně ovlivňován výstupem dopravních proudů ze sousední křižovatky.

Koordinované dopravní proudy tak získají na sousedních křižovatkách shodné doby zelené v odpovídajících časových úsecích, čímž bude zajištěna plynulost provozu na sousedních křižovatkách, pozitivní psychologický vliv na řidiče, protože budou moci vstoupit do sousedních křižovatek bez omezení rychlosti a nesnížené soustředění řidičů, kteří se ve zvýšené míře nemusí zabývat ovládáním vozidla a mohou se zabývat především dopravní situací.

Nekoordinovaným dopravním proudům bude přiřazována doba zelené obdobně jako u izolovaných křižovatek s tím, že některé doby zelené nekoordinovaných dopravních proudů budou ovlivňovány dobami zelené koordinovaných dopravních proudů. V žádném případě však nesmí dojít k tomu, že nabízená doba zelené pro nekoordinovaný dopravní proud bude nižší než požadovaná doba zelené.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce s názvem Modely pro koordinaci silně závislých světelných křižovatek se zabývá možnostmi matematického modelování vybraných typů křižovatek.

2.1 Cíle práce

- Analyzovat dostupné přístupy k modelování závislých křižovatek.
- Navrhnout matematické modely základních typů silně závislých křižovatek.
- Ověřit správnost navrhnutých modelů počítačovými experimenty.

2.2 Osnova práce

1. Úvod
2. Cíle disertační práce
3. Současný stav teorie tvorby signálních plánů
4. Potřebné pojmy a tvrzení
5. Logika řízení světelných křižovatek v Petriho sítích
6. Modely základních typů silně závislých křižovatek
7. Vyhodnocení experimentů na reálných datech
8. Použité softwarové nástroje
9. Závěr

3. SOUČASNÝ STAV TVORBY SIGNÁLNÍCH PLÁNŮ

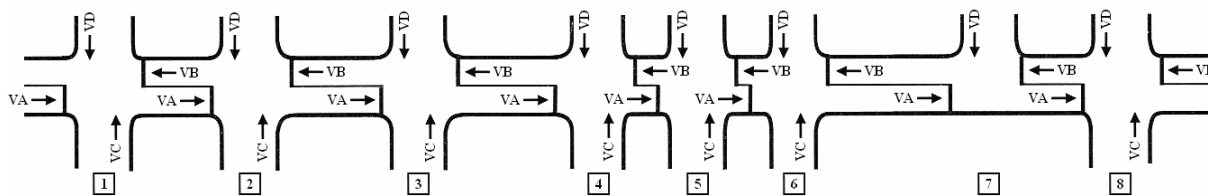
K návrhu koordinace křižovatek lze v současné době použít především technické podmínky TP 81, které se zabývají veškerými náležitostmi souvisenými s návrhem světelného řízení křižovatek a tedy i jejich koordinací [13]. Dále je možné použít matematický model pro tvorbu signálních plánů soustavy světelně řízených křižovatek [14], který vychází z matematického modelu pro řízení dopravy na křižovatce vytvořeného řešitelským kolektivem ve Výzkumném ústavu v dopravním v Žilině, Černý a kolektiv [6].

Kromě uznávaných konvenčních přístupů lze pro návrh světelného řízení křižovatek a jejich koordinaci využít také Petriho sítí [2], [8] a max-plus algebry [3], [4].

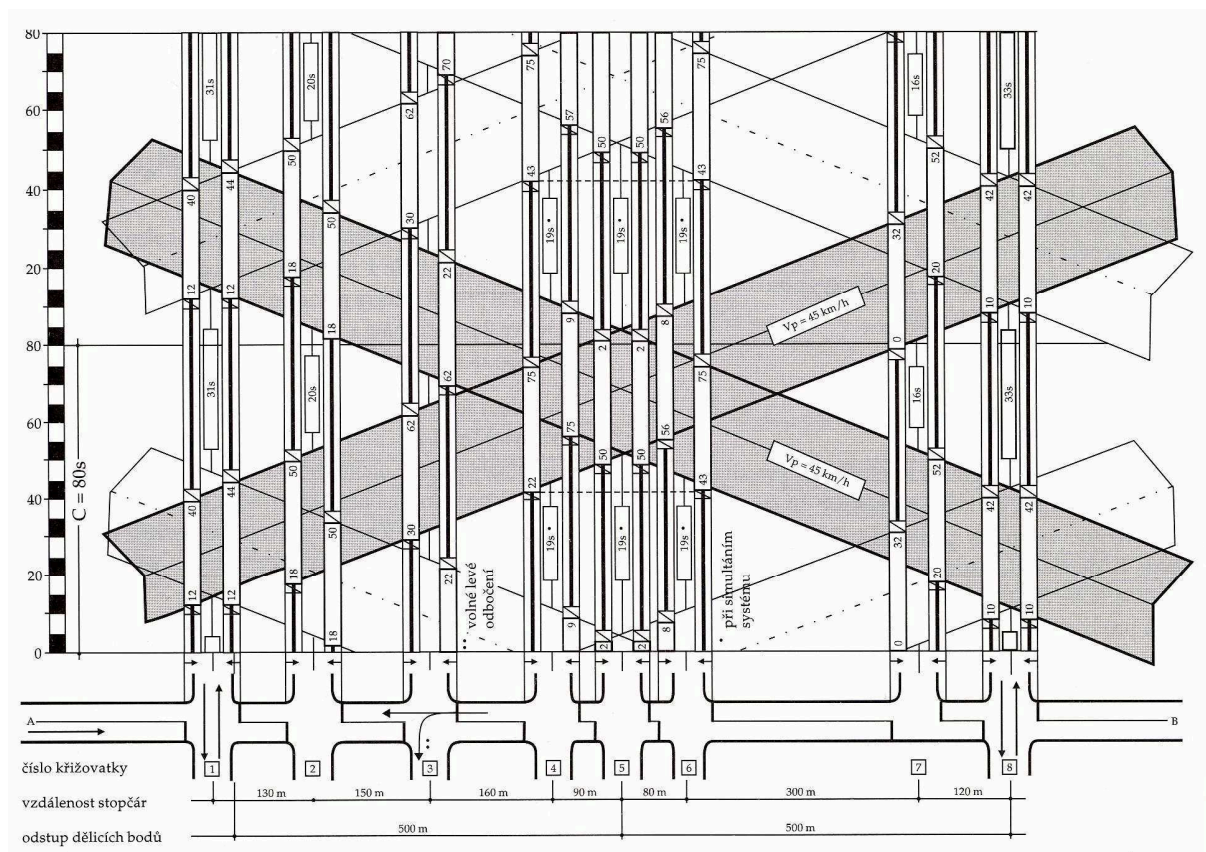
3.1 Přístupy uvedené v technických podmínkách TP 81

V rámci technických podmínek TP 81 je možné použít metodu saturovaného toku, metodu spotřeby času a iterační metodu k navrhování světelného řízení křižovatek a grafický nebo numerický způsob k navrhování koordinace světelného řízení křižovatek. Dále bude pozornost věnována grafickému způsobu řešení koordinace křižovatek.

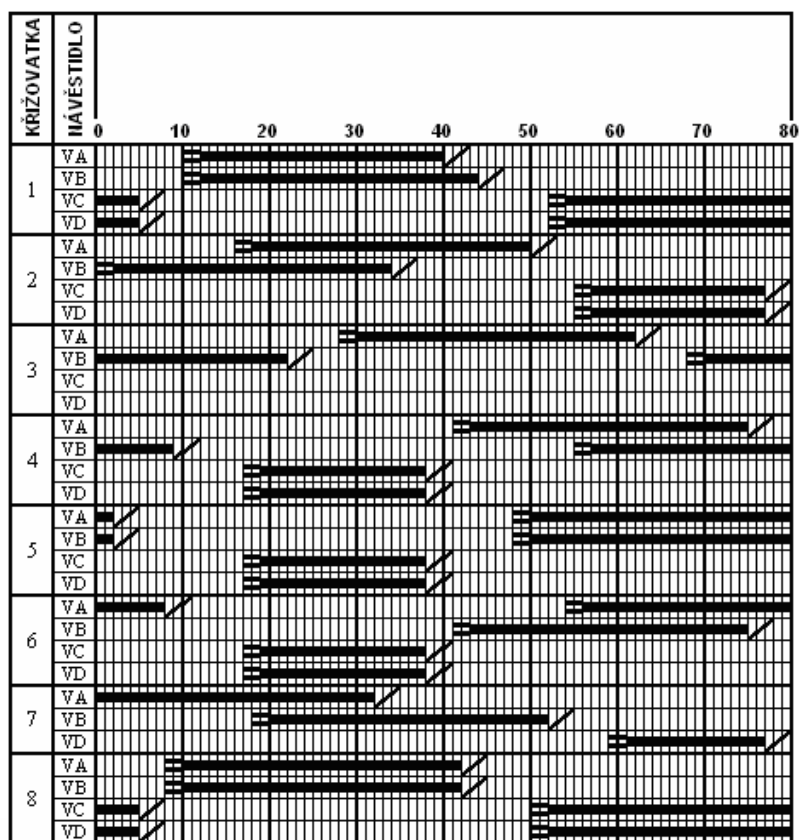
Po splnění předpokladů se při grafickém způsobu vytváří diagram dráha - čas [13], v němž se vynášejí vzdálenosti mezi jednotlivými křižovatkami na vodorovnou osu a stanovené délky cyklu na svislou osu. Pohyb koordinovaných proudů se znázorňuje se prostřednictvím tzv. zelených svazků. Na jednotlivých křižovatkách jsou v zelených svazcích vyznačeny začátky a konce zelených pro koordinované proudy. Příklad diagramu dráha - čas, z něhož byl sestaven signální plán (obr. č. 3) pro soustavu křižovatek (obr. č. 1), je uveden na obr. č. 2.



Obr. č. 1: Schéma koordinovaných křižovatek



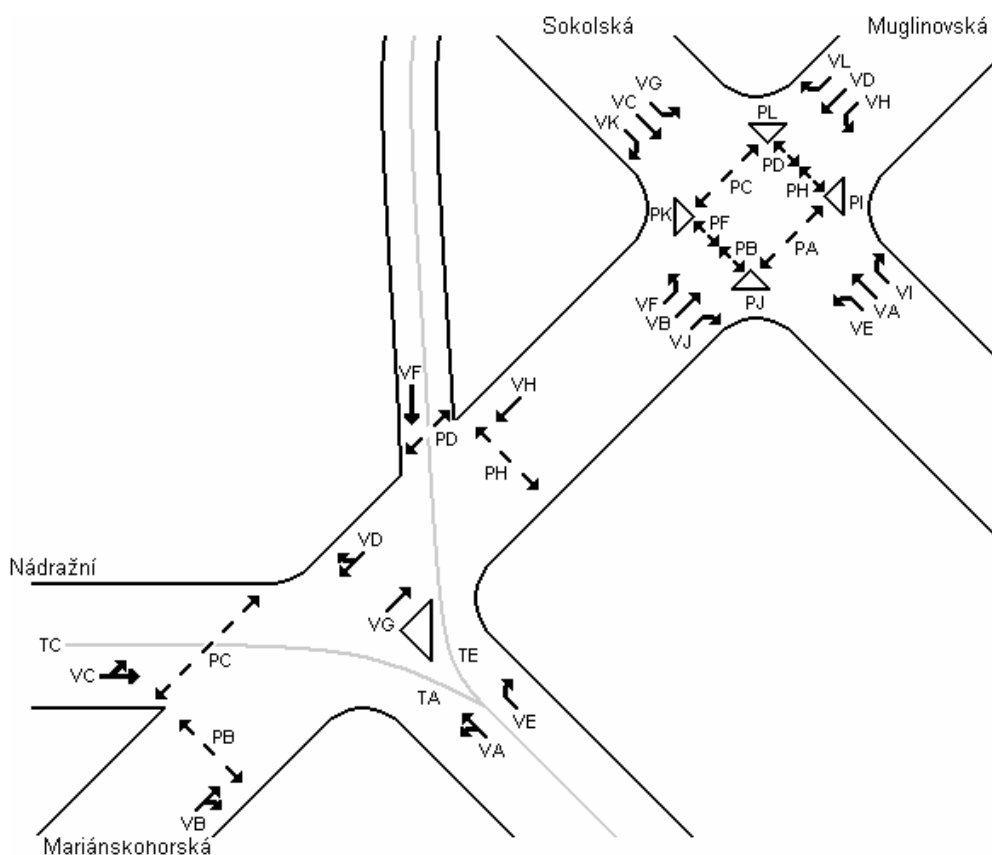
Obr. č. 2: Diagram dráha - čas



Obr. č. 3: Signální plán pro koordinované křižovatky

3.2 Model lineárního programování

Model lineárního programování byl aplikován [14] při koordinaci křižovatek Mariánskohorská-Nádražní a Muglinovská-Sokolská v Ostravě (obr. č. 4), kde byly koordinovány vozidlové proudy ve směrech Mariánská-Muglinovská. a Muglinovská-Mariánskohorská.



Obr. č. 4: Schéma koordinovaných křižovatek v Ostravě

Matematický model pro řízení dopravy na křižovatce [6] a tvorbu signálních plánů soustavy světelně řízených křižovatek [14] existuje ve dvou variantách. V první variantě se prostřednictvím účelové funkce (1), (10) při zohlednění omezujících podmínek (3) - (9), resp. (12) - (20) maximalizuje minimální poměrná rezerva mezi nabízenou a průměrně požadovanou dobou zelené a ve druhé variantě se prostřednictvím účelové funkce (2), (11) minimalizuje délka cyklu při zohlednění omezujících podmínek (3) - (9), resp. (12) - (20). Před popisem matematických modelů budou uvedeny symboly označující veličiny, které v těchto matematických modelech vystupují.

Proměnné veličiny:

u	minimální poměrná rezerva mezi nabízenou a průměrně požadovanou dobou zelené (1. varianta),
c	délka cyklu (2. varianta),
x_i	začátek zelené pro i-tý dopravní proud,
x_{ki}	začátek zelené pro i-tý dopravní proud na k-té křižovatce,
y_i	konec zelené pro i-tý dopravní proud,
y_{ki}	konec zelené pro i-tý dopravní proud na k-té křižovatce.

Konstantní veličiny:

u	minimální poměrná rezerva mezi nabízenou a průměrně požadovanou dobou zelené (2. varianta),
c	délka cyklu (1. varianta),
q_i	intenzita účastníků silničního provozu v i-tém vozidlovém proudu, kteří se ucházejí o vstup do křižovatky za hodinu,
q_{ki}	intenzita účastníků silničního provozu v i-tém vozidlovém proudu, kteří se ucházejí o vstup do k-té křižovatky za hodinu,
m_{ij}	mezičas, který musí uplynout mezi koncem vstupu i-tého proudu do křižovatky a začátkem vstupu j-tého proudu do křižovatky stanovený pro dvojice kolizních proudů,
m_{kij}	mezičas, který musí uplynout mezi koncem vstupu i-tého proudu do křižovatky a začátkem vstupu j-tého proudu do křižovatky stanovený pro dvojice kolizních proudů na k-té křižovatce,
δ	minimální doba, kterou potřebuje vozidlový proud pro vjezd do křižovatky, (volí se zpravidla 2 s),
τ	minimální doba zelené pro vozidlový proud (stanovená hodnota 5 s),
t_j	doba jízdy koordinovaným úsekem (v obou směrech),
t_v	vyklizovací doba koordinovaného úseku,
P	množina dopravních proudů $P = \{P_1, P_2, \dots, P_p\}$,
F	množina fází $F = \{F_1, F_2, \dots, F_f\}$
S	množina křižovatek $S = \{S_1, S_2\}$,
T	množina dvojic koordinovaných proudů $T \subseteq P \times P$,

3.2.1 Matematický model pro řízení dopravy na křižovatce

Matematický model pro řízení dopravy na křižovatce má tvar:

$$\max u \text{ (1. varianta)} \quad (1)$$

$$\min c \text{ (2. varianta)} \quad (2)$$

za podmínek:

$$y_i - x_i \geq \tau \quad \text{pro } P_i \in P \quad (3)$$

Podmínka (3) zajišťuje pro každý dopravní proud minimální dobu zelené, kterou předepisují technické podmínky TP 81.

$$y_i - x_i \geq \frac{\delta \cdot q_i \cdot c \cdot u}{3600} \quad \text{pro } P_i \in P \quad (4)$$

Podmínka (4) zajišťuje, aby pro každý vozidlový proud vjíždějící do křižovatky byla hodnota poměrné rezervy vyšší nebo rovna minimální poměrné rezervě.

$$x_j - y_i \geq m_{ij} \quad \text{pro } P_i \in F_i, P_j \in F_{i+1} \quad (5)$$

Podmínka (5) zajišťuje zachování mezičasů pro dvojice kolizních proudů v rámci cyklu.

$$x_j - y_i \geq m_{ij} - c \quad \text{pro, } P_i \in F_f, P_j \in F_l \quad (6)$$

Podmínka (6) zajišťuje zachování mezičasů pro dvojice kolizních proudů při přechodu mezi jednotlivými cykly.

$$x_i, y_i \in Z^+ \cup \{0\} \quad (7)$$

$$u \geq 0 \text{ (1. varianta)} \quad (8)$$

$$c \geq 0 \text{ (2. varianta)} \quad (9)$$

Podmínky (7), (8) a (9) jsou obligatorními podmínkami. Symbolem Z^+ je označena množina celých kladných čísel.

3.2.2 Matematický model pro koordinaci dvou křižovatek

Matematický model pro koordinaci dvou křižovatek má tvar:

$$\max u \text{ (1. varianta)} \quad (10)$$

$$\min c \text{ (2. varianta)} \quad (11)$$

za podmínek:

$$y_{ki} - x_{ki} \geq \tau \quad \text{pro } S_k \in S, P_i \in P \quad (12)$$

Podmínka (12) zajišťuje pro každý dopravní proud minimální dobu zelené, kterou předepisují technické podmínky TP 81.

$$y_{ki} - x_{ki} \geq \frac{\delta \cdot q_{ki} \cdot c \cdot u}{3600} \quad \text{pro } S_k \in S, P_i \in P \quad (13)$$

Podmínka (13) zajišťuje, aby pro každý vozidlový proud vjíždějící do křižovatky byla hodnota poměrné rezervy vyšší nebo rovna minimální poměrné rezervě.

$$x_{kj} - y_{ki} \geq m_{kij} \quad \text{pro } S_k \in S, P_i \in F_i, P_j \in F_{i+1} \quad (14)$$

Podmínka (14) zajišťuje zachování mezičasů pro dvojice kolizních proudů v rámci cyklu.

$$x_{kj} - y_{ki} \geq m_{kij} - c \quad \text{pro } S_k \in S, P_i \in F_f, P_j \in F_1 \quad (15)$$

Podmínka (15) zajišťuje zachování mezičasů pro dvojice kolizních proudů při přechodu mezi jednotlivými cykly.

$$x_{2i} + t_v \leq x_{1i} + t_j \quad \text{pro } P_i \in T \quad (16)$$

$$y_{1i} + t_j \leq y_{2i} \quad \text{pro } P_i \in T \quad (17)$$

Podmínky (16) a (17) zajišťují návaznosti dob zelených pro koordinované proudy.

$$x_{ki}, y_{ki} \in Z^+ \cup \{0\} \quad (18)$$

$$u \geq 0 \text{ (1. varianta)} \quad (19)$$

$$c \geq 0 \text{ (2. varianta)} \quad (20)$$

Podmínky (18), (19) a (20) jsou obligatorními podmínkami. Symbolem Z^+ je označena množina celých kladných čísel.

Výstupními údaji z matematických modelů v první variantě jsou začátky a konce zelených na křižovatkách, které slouží pro sestavení signálního plánu s předem stanovenou délkou cyklu, a hodnota minimální poměrné rezervy, která slouží k ověření zda je předem stanovená délka cyklu na křižovatkách dostačující.

Výstupními údaji z matematických modelů pro koordinaci křižovatek ve druhé variantě jsou začátky a konce zelených na křižovatkách, které slouží pro sestavení signálního plánu s předem stanovenou hodnotou minimální poměrné rezervy, a hodnota délky cyklu, která je určuje jeho minimální délku.

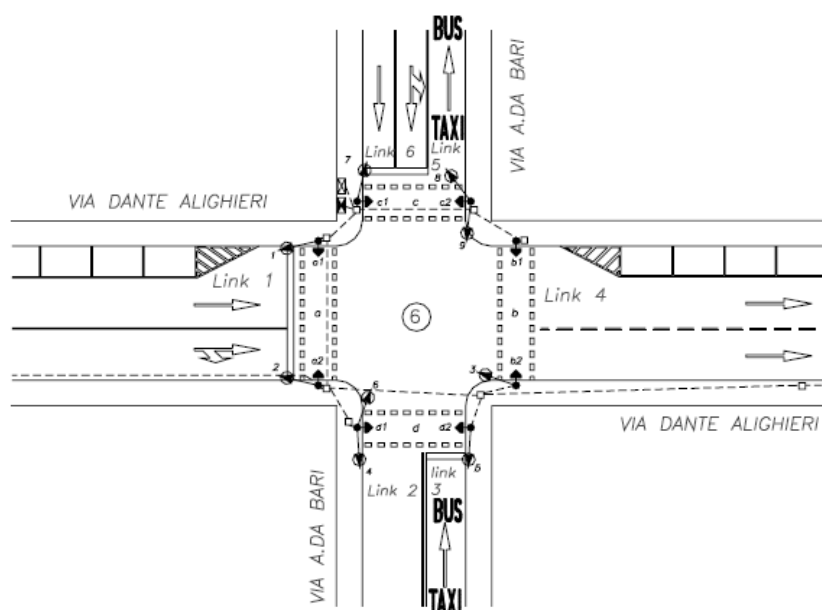
3.3 Petriho síť

Petriho síť představují nástroj určený k modelování a analýze procesů, protože umožňují popisovat specifickými prostředky řídicí toky a informační závislosti uvnitř modelovaných systémů. Modelované systémy se v Petriho síti vytvářejí prostřednictvím prvků, které představují jednotlivé části systému, přičemž každý prvek má stanovený význam a definované vlastnosti. Jednotlivé prvky se sestavují podle pravidel pro uskutečňování přechodů v Petriho síti tak, aby docházelo pouze k uskutečňování změn stavů systému, které nejsou v konfliktu, a nedocházelo k uskutečňování změn, které se v konfliktu nacházejí [11], [12].

Při vhodném definování prvků a jejich uspořádání v Petriho síti tak, aby odpovídaly prvkům světelného řízení křižovatek (návěstidla SSZ, návěstní znaky, vozidla apod.) a vztahům, které mezi těmito prvky existují, je možné zajistit na světelné křižovatce bezpečný a plynulý provoz. Uvedený princip zajišťujících bezpečný a plynulý provoz na křižovatce byl aplikován ve literatuře [9], která představuje možnosti modelování a simulace dynamického řízení křižovatek s předem stanovenými fázemi v software HPetriSim.

V průběhu čtyřicetileté historie Petriho sítí docházelo k jejich rozvoji a obohacování, čímž se zvýšila modelovací schopnost Petriho sítí umožňující např. zahrnutí pojmu času. Petriho sítě s rozšířenými modelovacími schopnostmi se nazývají Petriho sítě vysoké úrovně.

Do skupiny Petriho sítí vysoké úrovně patří také Barevné Časované Petriho sítě, které byly v literatuře [8] využity ke světelnému řízení křižovatky v Bari (Itálie) (obr. č. 5).



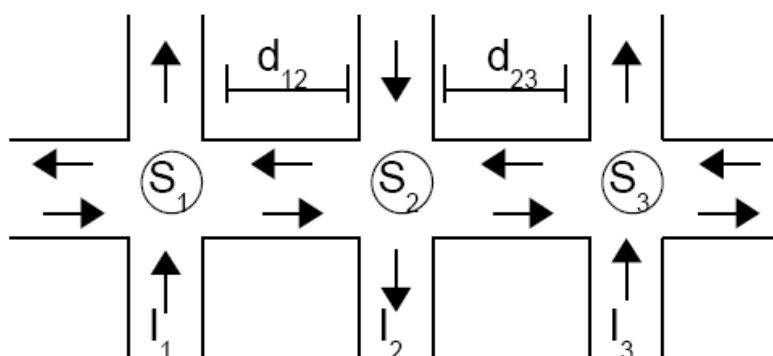
Obr. č. 5: Schéma řešené křižovatky v Bari (Itálie)

V rámci Časovaných Petriho sítí existují Časované Událostní grafy (Timed Event Graphs TEG), které se vyznačují tím, že každé místo má pouze jeden vstupní přechod a je možné předdefinovat podmínky, za kterých je možné vstupní přechod uskutečnit.

3.4 Max-plus algebra

K rozhodování za jakých podmínek mají být přechody uskutečněny lze použít matematický nástroj nazývaný max-plus algebra, v němž se definují operace $a \oplus b = \max(a, b)$ a $a \otimes b = a + b$. Jedná se o originální aplikace nelineární algebry při řešení synchronizačních problémů a nový přístup k řešení optimalizačních problémů, který může být použit pro návrh světelného řízení křižovatek a jejich koordinaci.

Návrh koordinace světelně řízených křižovatek využívajících matematický nástroj max-plus algebry a modelovací nástroj speciální Petriho sítě TEG byl představen v literatuře [2]. Soustava tří koordinovaných křižovatek, která byla řešena v literatuře [2] je uvedena na obr. č. 6. Vozidlové proudy, které jsou reprezentovány šipkami, vstupují do křižovatek (I_1, I_2, I_3). Na návěstidlech světelného signalizačního zařízení (S_1, S_2, S_3) je s ohledem na jízdní doby mezi křižovatkami (d_{12}, d_{23}) modelována zelená vlna pro koordinované proudy ($S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3, S_3 \rightarrow S_2 \rightarrow S_1$)



Obr. č. 6: Schéma tří koordinovaných křižovatek

Perspektivní řešení koordinace křižovatek představují obsáhlé matematické modely, které ve spojení s výpočtovou silou software řešícího matematické programování a matematický aparát max-plus algebry umožňují efektivně řídit koordinované a nekoordinované dopravní proudy na světelně řízených křižovatkách. Na ověření výstupů získaných z obsáhlých matematických modelů se ukazují perspektivními časově závislé Petriho sítě, které prostřednictvím vizualizace ukazují dopravním inženýrům poměrně pohodlnou možnost detailní analýzy kritických událostí na křižovatkách.

4. POTŘEBNÉ POJMY A TVRZENÍ

V této kapitole budou uvedeny potřebné pojmy a tvrzení související se světelným řízením křižovatek, Petriho sítěmi a matematickým aparátem max-plus algebry.

4.1 Základní pojmy při řízení světelných křižovatek

Při navrhování světelného řízení křižovatek se používají pojmy uvedené v technických podmínkách TP 81. Dále jsou popsány vybrané základní pojmy používané při řízení světelných křižovatek.

Fáze - časový interval, v němž mají současně volno určité, zpravidla nekolizní dopravní pohyby na křižovatce.

Fázové schéma - přiřazení dopravních pohybů jednotlivým fázím a určení nejvýhodnějšího pořadí fází.

Kolizní dopravní pohyby - vzájemné pohyby vozidel a chodců, které se kříží, nebo připojují. Místům, kde se tak děje, říkáme kolizní plochy. Pro zjednodušení se používají kolizní body, tj. průsečíky trajektorií možných vozidlových proudů.

Koordinace - zajištění průjezdu vozidel soustavou světelných křižovatek v koordinovaném směru bez zastavení prostřednictvím vhodného návrhu signálních plánů.

Mezičas - časový interval od konce signálu volno na návěstidle pro jeden směr po začátek signálu volno na návěstidle pro kolizní směr. Pro jeho stanovení jsou podstatné kolizní dopravní pohyby.

Signální plán - program řízení světelného signalizačního zařízení, který určuje pořadí a délku signálu volno na jednotlivých návěstidlech.

Podmíněně kolizní dopravní pohyby - pohyby vozidel a chodců, pro které i při světelném řízení křižovatky platí příslušná pravidla provozu na pozemních komunikacích o přednosti v jízdě.

Kromě základních pojmů je nutné znát typy dopravních proudů, resp. odpovídající signály na návěstidlech SSZ, které se na křižovatkách vyskytují. V rámci předložené práce se bude jednat dopravní proudy, resp. odpovídající signály na návěstidlech SSZ uvedené v tab. č. 1.

Tab. č. 1: Označování dopravních proudů

Typ dopravního proudu, resp. odpovídajícího signálu	Označení
Vozidlový proud jemuž odpovídá signál pro vozidla	VA
Pěší proud jemuž odpovídá signál pro chodce	PA
Vozidlový proud jemuž odpovídá signál doplňkové zelené šipky	SA

4.2 Petriho síť

Petriho sítěmi je označována široká třída diskretních matematických modelů, které umožňují popisovat specifickými prostředky řídicí toky a informační závislosti uvnitř modelovaných systémů. Více než čtyřicetiletá historie Petriho sítí je charakterizována postupným rozvojem jednotlivých Petriho sítí, při kterém byly na základě jednoduchých Petriho sítí vytvářeny složitější Petriho sítě, jenž jsou definovány jako Petriho síť vysoké úrovně.

Petriho síť je čtveřice $N = (P, T, O, I)$,

kde:

P je konečná množina míst (places),

T je konečná množina přechodů (transitions), $T \cap P = \emptyset$,

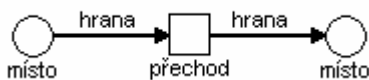
I je vstupní přechodová funkce (input function), $P \times T \rightarrow N_0$,

O je výstupní přechodová funkce (output function), $T \times P \rightarrow N_0$,

N_0 je množina přirozených čísel.

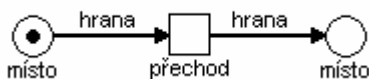
Čtveřice $N = (P, T, O, I)$ se zobrazuje orientovaným grafem, který skládá z vrcholů, jež jsou propojeny orientovanými hranami. Množina vrcholů se skládá ze dvou disjunktních podmnožin - množiny míst a množiny přechodů, přičemž místa a přechody se v průběhu cesty střídají. Kromě orientace hran obsahuje Petriho síť ohodnocení vrcholů, které určuje jejich

kapacitu a ohodnocení hran, které určuje jejich násobnost. Na základě uvedených vlastností lze Petriho síť definovat jako orientovaný ohodnocený bipartitní graf. Elementární Petriho síť je prezentováno na obr. č. 7.



Obr. č. 7: Elementární Petriho síť

Umístěním značek (tokens) do vstupních míst přechodů je možné zobrazit stav systému. Změna stavu se uskutečňuje prostřednictvím přechodů tak, že po uskutečnění přechodů se umístí nové tokeny do výstupních míst přechodů, čímž se opět zobrazí stav systému. Pravidla pro uskutečňování pro změny stavů jsou uvedeny v další části textu. Grafické vyjádření Petriho sítě s označením je prezentováno na obr. č. 8.



Obr. č. 8: Elementární Petriho síť s tokenem

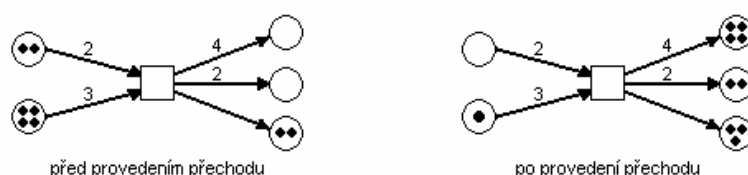
V dalším textu budou podrobněji popsány P/T Petriho sítě, které mohou být použity pro návrh logiky řízení světelných křižovatek. Uvedený popis P/T Petriho sítí, grafické vyjádření P/T Petriho sítí a definování pravidel pro uskutečňování přechodů v P/T Petriho sítích lze v určité míře vztáhnout na libovolnou Petriho síť.

P/T Petriho síť tvoří místa (places), přechody (transitions), orientované hrany (arcs) a značky (tokens), jejich grafické vyjádření je uvedeno v tab. č. 2. Každému místu p je přiřazena kapacita k udávající maximální počet tokenů, který se v místě p může současně nacházet a každé hraně a je přiřazena násobnost w udávající maximální počet tokenů, který se po hraně a může současně přesunovat. Kapacity míst a násobnosti hran jsou představovány ohodnocením míst, resp. ohodnocením hran. Místo p bez ohodnocení je považováno za místo s neomezenou kapacitou. Hrana a bez ohodnocení je považována za jednoduchou (s násobností 1).

Tab. č. 2: Prvky P/T Petriho sítě

Označení prvků v P/T Petriho síti	Význam prvků v P/T Petriho síti
○	Místa (places)
□	Přechody (transitions)
→	Orientované hrany (arcs)
•	Značky (tokens)

Počáteční stav P/T Petriho sítě je dán výchozím značením, při kterém se zajišťuje splnění vstupních míst přechodů, které mají být provedeny. Uskutečněním proveditelných přechodů se přesouvají tokeny do výstupních míst uskutečněných přechodů, čímž dochází ke změně stavu P/T Petriho sítě. Výstupní místa uskutečněných přechodů mohou být vstupními místy přechodů, které mají být teprve uskutečněny. Uskutečněním dalších přechodů dochází opět ke změně stavu P/T Petriho sítě. Uvedený princip se neustále opakuje a může být ukončen, jestliže z místa nevedou žádné orientované hrany.



Obr. č. 9: Příklad změny stavu v P/T Petriho síti

Změny stavů P/T Petriho sítě se uskutečňují podle následujících zásad [12]:

- stav sítě je určen značením, tj. počtem tokenů v každém místě,
- místo p patří do vstupní množiny přechodu t , jestliže z místa p vede orientovaná hrana do přechodu t ,
- místo p patří do výstupní množiny přechodu t , jestliže z přechodu t vede orientovaná hrana do místa p ,
- přechod t je proveditelný, jestliže pro každé místo p vstupní množiny přechodu t platí, že obsahuje alespoň tolik tokenů, kolik činí násobnost hrany vedoucí z místa p do přechodu t ,
- přechod t je proveditelný jestliže pro každé místo p výstupní množiny přechodu t platí, že násobnost hrany vedoucí z přechodu t do místa p nepřevyšuje kapacitu místa p ,

- při změně stavu se nejdříve počet tokenů v každém vstupním místě p přechodu t zmenší o násobnost hrany w spojující místo p s přechodem t a následně se počet tokenů v každém výstupním místě p přechodu t zvětší o násobnost hrany w spojující přechod t s místem p .

4.3 Max-plus algebra

Max-plus algebra se objevila jako vhodný matematický aparát pro popis chování diskretních dynamických systémů v roce 1950. K hledání optimálních řešení využívá max-plus algebra specifické operace vhodné pro modelování a analýzu synchronizovaných systémů. Představuje matematický nástroj, v němž se aritmetická operace sčítání nahrazuje určováním maxima a aritmetická operace násobení se nahrazuje sčítáním. Jedná se tedy o originální aplikace nelineární algebry při řešení synchronizačních problémů a nový přístup k řešení některých optimalizačních problémů, který může být použit pro návrh světelného řízení křižovatek a jejich koordinaci.

Nyní budou popsány základní vlastnosti využité v této práci. Podrobnější informace o max-plus algebře jsou uvedeny v literatuře [1], [3], [4], a [10].

Definujeme-li $\varepsilon = -\infty$ a $e = 0$, a označíme-li $\mathfrak{R}_{\max} = \mathfrak{R} \cup \{\varepsilon\}$, kde \mathfrak{R} je množina reálných čísel, pak pro prvky $a, b \in \mathfrak{R}_{\max}$ definujeme operace \oplus a \otimes :

$$a \oplus b = \max(a, b),$$

$$a \otimes b = a + b.$$

Max-plus algebrou budeme chápat algebraickou strukturu $\mathfrak{R}_{\max} = (\mathfrak{R}_{\max}, \oplus, \otimes, \varepsilon, e)$ s následujícími vlastnostmi.

- asociativnost:

$$\forall x, y, z \in \mathfrak{R}_{\max} : x \oplus (y \oplus z) = (x \oplus y) \oplus z, \max(x, \max(y, z)) = \max(\max(x, y), z),$$

$$\forall x, y, z \in \mathfrak{R}_{\max} : x \otimes (y \otimes z) = (x \otimes y) \otimes z, x + (y + z) = (x + y) + z.$$

- komutativnost:

$$\forall x, y \in \mathfrak{R}_{\max} : x \oplus y = y \oplus x, \max(x, y) = \max(y, x),$$

$$\forall x, y \in \mathfrak{R}_{\max} : x \otimes y = y \otimes x, x + y = y + x.$$

- distributivnost:

$$\forall x, y, z \in \mathfrak{R}_{\max} : x \otimes (y \oplus z) = (x \otimes y) \oplus (x \otimes z), x + \max(y, z) = \max(x + y, x + z).$$

- existence nulového prvku:

$$\forall x \in \mathfrak{R}_{\max} : x \oplus \varepsilon = \varepsilon \oplus x = x, \max(x, \varepsilon) = \max(\varepsilon, x) = x.$$

- existence jednotkového prvku:

$$\forall x \in \mathfrak{R}_{\max} : x \otimes e = e \otimes x = x, x + e = e + x = x.$$

- absorpce nulového prvku k \otimes :

$$\forall x \in \mathfrak{R}_{\max} : x \otimes \varepsilon = \varepsilon \otimes x = \varepsilon, x + \varepsilon = \varepsilon + x = \varepsilon.$$

- Idempotence k \oplus :

$$\forall x \in \mathfrak{R}_{\max} : x \oplus x = x, \max(x, x) = x.$$

Množinu $m \times n$ matic v max-plus algebře značíme $\mathfrak{R}_{\max}^{m \times n}$ s prvky jako v lineární algebře. Pro prvky $a, b \in \mathfrak{R}_{\max}^{m \times n}$ definujeme následující operace:

- sčítání matic:

$$A \oplus B = [A \oplus B]_{ij} = [a_{ij} \oplus b_{ij}] = [\max(a_{ij}, b_{ij})],$$

- násobení matic konstantou:

$$c \otimes A = [c \otimes a_{ij}] = [c + a_{ij}] = [a_{ij} + c] = A \otimes c,$$

Množinu $m \times n$ a $n \times p$ matic v max-plus algebře značíme $\mathfrak{R}_{\max}^{m \times n}$ a $\mathfrak{R}_{\max}^{n \times p}$ s prvky jako v lineární algebře. Pro prvky $a \in \mathfrak{R}_{\max}^{m \times n}$ a $b \in \mathfrak{R}_{\max}^{n \times p}$ definujeme následující operaci:

- násobení matic:

$$A \otimes B = [A \oplus B]_{ij} = \left[\max_k (a_{ik} + b_{kj}) \right].$$

Nechť matice $A \in \mathfrak{R}_{\max}^{n \times n}$, skalár $\lambda \in \mathfrak{R}_{\max}$ a vektor $x \in \mathfrak{R}_{\max}^n$, který obsahuje alespoň jeden konečný prvek, jsou takové, že $A \otimes x = \lambda \otimes x$. Potom λ nazveme *vlastní hodnotou* matice A a x nazveme *vlastním vektorem* matice A sdruženým s vlastní hodnotou λ .

$$A \otimes x = \lambda \otimes x$$

lze zapsat maticovým zápisem:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \lambda \otimes \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

a zápisem po složkách v max-plus algebře:

$$\begin{aligned} (a_{11} \otimes x_1) \oplus (a_{12} \otimes x_2) \oplus \dots \oplus (a_{1n} \otimes x_n) &= \lambda \otimes x_1 \\ (a_{21} \otimes x_1) \oplus (a_{22} \otimes x_2) \oplus \dots \oplus (a_{2n} \otimes x_n) &= \lambda \otimes x_2 \\ \vdots & \\ (a_{n1} \otimes x_1) \oplus (a_{n2} \otimes x_2) \oplus \dots \oplus (a_{nn} \otimes x_n) &= \lambda \otimes x_n. \end{aligned}$$

Klasický zápis po složkách v lineární algebře je:

$$\begin{aligned} \max\{(a_{11} + x_1), (a_{12} + x_2), \dots, (a_{1n} + x_n)\} &= \lambda + x_1 \\ \max\{(a_{21} + x_1), (a_{22} + x_2), \dots, (a_{2n} + x_n)\} &= \lambda + x_2 \\ \vdots & \\ \max\{(a_{n1} + x_1), (a_{n2} + x_2), \dots, (a_{nn} + x_n)\} &= \lambda + x_n. \end{aligned}$$

Necht' matice $A \in \mathfrak{R}_{\max}^{n \times n}$. Komunikačním grafem $G(A) = (V(A), H(A), w)$, kde $V(A) = \{1, 2, \dots, n\}$ je množina vrcholů, $H(A) = \{(i, j) \in V(A) \times V(A) : a_{ji} \neq \varepsilon\}$ je množina hran a w je ohodnocení hran.

Necht' $\pi = (i_1, i_2, \dots, i_p, i_1)$ označuje sled v grafu $G(A)$ délky $l(\pi) = p$. Potom ohodnocení π je $\omega(\pi, A) = a_{i_1 i_2} \otimes a_{i_2 i_3} \otimes \dots \otimes a_{i_{p-1} i_p} \otimes a_{i_p i_1}$, přičemž graf $G(A)$ má alespoň jeden cyklus. Symbolem $\lambda(A)$ budeme značit ohodnocení maximálního průměrného cyklu matice A .

$$\lambda(A) = \max_{\pi} \frac{\omega(\pi, A)}{l(\pi)}, \quad (21)$$

kde se maximalizuje přes všechny cykly v grafu $G(A)$.

Tvrzení 1

Necht' $A \in \mathfrak{R}_{\max}^{n \times n}$. Necht' $P(i, j; k)$ je množina všech cest z vrcholu i do vrcholu j o délce k v komunikačním grafu $G(A)$. Potom pro všechny $k \geq 1$: $(A^{\otimes k})_{ji} = \max\{p|_w : p \in P(i, j; k)\}$, kde v případě $(A^{\otimes k})_{ji} = \varepsilon$, je $P(i, j; k)$ prázdná množina [3].

Tvrzení 2

Necht' $A \in \mathfrak{R}_{\max}^{n \times n}$ je ireducibilní, potom existuje jedno konečné vlastní číslo (s několika vlastními vektory), které se rovná ohodnocení maximálního průměrného cyklu v grafu $G(A)$ [3].

Tvrzení 3

Necht' $A \in \mathfrak{R}_{\max}^{n \times n}$ je matice. Pak je nerovnice $A \otimes x \leq \mu \otimes x$ řešitelná tehdy, když $\mu \geq \lambda(A)$ [5].

Pokud matice $A = (a_{ij}) \in \mathfrak{R}_{\max}^{n \times n}$ je ireducibilní nebo ekvivalentní graf $G(A)$ silně souvislý, potom právě jedna vlastní hodnota (je možné několik vlastních vektorů příslušejících vlastní hodnotě) a tato vlastní hodnota je rovna ohodnocení maximálního průměrného cyklu v grafu $G(A)$.

Pro matici $A \in \mathfrak{R}_{\max}^{n \times n}$ uvažujme rekurentní vztah $x(k+1) = A \otimes x(k)$, kde pro všechna $k \geq 0$, kterým můžeme popsat dynamiku diskrétního systému.

Pokud $\lambda \in \mathfrak{R}_{\max}$ a $v \in \mathfrak{R}_{\max}^n$ jsou vlastní hodnota a vlastní vektor matice A , potom řešení rovnice $x(k+1) = A \otimes x(k)$ pro $x(0) = v$ je určené rovnicí $x(k) = \lambda^{\otimes k} \otimes v$.

Pro výpočet vlastního vektoru lze využít Hawardův [10] nebo Karpův algoritmus [10], který obsahuje následující kroky:

Krok 1 vybereme náhodné $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ a položíme $x(0) = (\varepsilon, \dots, \varepsilon, e, \varepsilon, \dots)$ s nulovým prvkem v i -té složce,

Krok 2 vypočítáme $x(k) = A \otimes x(k-1)$ pro $k \in \{1, 2, \dots, n\}$,

Krok 3 vypočítáme vlastní číslo $\lambda = \max_{i=1, \dots, n} \min_{k=0, \dots, n-1} \frac{x_i(n) - x_i(k)}{n - k}$.

5. LOGIKA ŘÍZENÍ SVĚTELNÝCH KŘÍŽOVATEK V PETRIHO SÍTÍCH

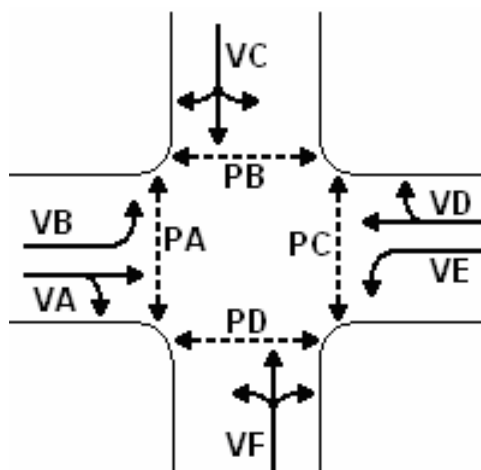
Vzhledem k tomu, že Petriho sítě představují nástroj určený k modelování a analýze procesů, lze předpokládat jejich možné uplatnění i při návrhu řídicí logiky světelných křižovatek. Řídicí logika světelných křižovatek musí z důvodu zachování základního principu světelného řízení křižovatek umožnit současné jízdy pouze nekolizním, resp. podmíněně kolizním dopravním proudům, aby byla zajištěna bezpečnost a plynulost provozu.

V případě, že pro návrh řídicí logiky využijeme kromě uznávaných konvenčních přístupů [6], příp. [7], také Petriho sítí, pak můžeme použít libovolnou Petriho síť, protože veškeré Petriho sítě obsahují prvky, jimiž lze modelovat všechny rozhodující aspekty světelně řízené křižovatky (návěstidla, světelné signály, změny světelných signálů).

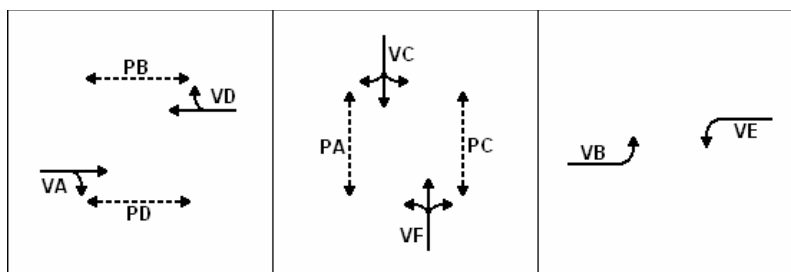
Z široké skupiny Petriho sítí lze pro návrh logiky řízení světelných křižovatek využít především P/T Petriho sítí, protože obsahují pouze prvky, resp. vlastnosti těchto prvků, které pro návrh řídicí logiky postačují. Další studium problematiky pak může poukázat na složitější typy Petriho sítí, kterých bude muset být využíváno. Při vytváření struktury P/T Petriho sítě se prvky sestavují tak, aby prostřednictvím pravidel pro uskutečňování přechodů byl splněn základní princip světelného řízení křižovatek, tj. zajištěno správné přepínání světelných signálů na návěstidlech světelného signalizačního zařízení a koordinace tohoto přepínání u všech světelných návěstidel pro jednotlivé směry.

Na základě výše uvedených informací bude pozornost věnována popisu P/T Petriho sítí a pravidel pro uskutečňování přechodů v P/T Petriho sítích.

Při návrhu logiky řízení světelné křižovatky [15], [16] byly zohledněny následující vstupní podklady: schéma vzorové křižovatky (obr. č. 10) a fázové schéma (obr. č. 11), prostřednictvím kterého se zajišťují časové intervaly, v nichž mají současně volno určité, zpravidla nekolizní dopravní pohyby na křižovatce. Pro návrh světelného řízení je pochopitelně zapotřebí ještě celá řada údajů, ty však s návrhem řídicí logiky nesouvisejí.



Obr. č. 10: Schéma vzorové křižovatky

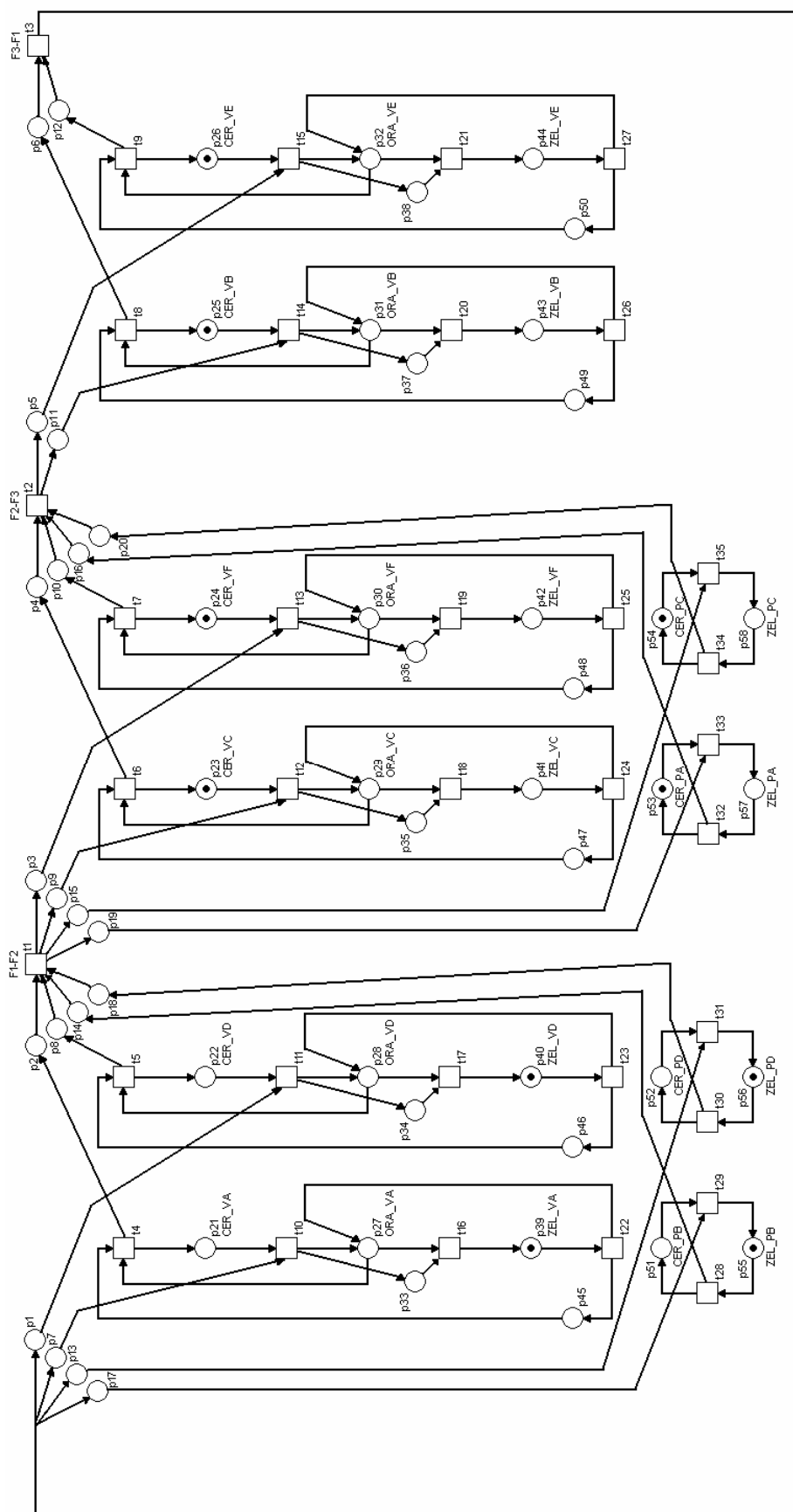


Obr. č. 11: Fázové schéma vzorové křižovatky

Před sestavením Petriho sítě byl stanoven význam prvků v zamýšlené Petriho síti. Místa v Petriho síti budou představovat světelné signály na návěstidlech SSZ, přechody v Petriho síti budou představovat okamžiky, při kterých dochází k přepínání světelných signálů, orientované hrany v Petriho síti umožňují realizovat změny stavů a aktuální poloha tokenu bude reprezentovat aktuální návěstní znak.

Při sestavování Petriho sítě se vychází z fázového schématu, v tomto případě se jednalo o fázové schéma uvedené na obr. č. 11. Nejdříve byla sestavena část Petriho sítě představující první fázi, resp. světelné signály na návěstidlech pro dopravní proudy, které se v první fázi vyskytují, následně byla sestavena část Petriho sítě představující druhou fázi, resp. světelné signály na návěstidlech pro dopravní proudy, které se vyskytují ve druhé fázi a část Petriho sítě představující třetí fázi, resp. světelné signály na návěstidlech pro dopravní proudy, které se vyskytují ve třetí fázi. Na závěr byly části Petriho sítě propojeny tak, aby mohlo docházet ke střídání fází v rámci cyklu.

Sestavená Petriho síť, do které byla doplněna světelná signalizace příslušných světelných signálů v jednotlivých fázích prostřednictvím tokenů (počáteční značení), je uvedena na obr. č. 12.

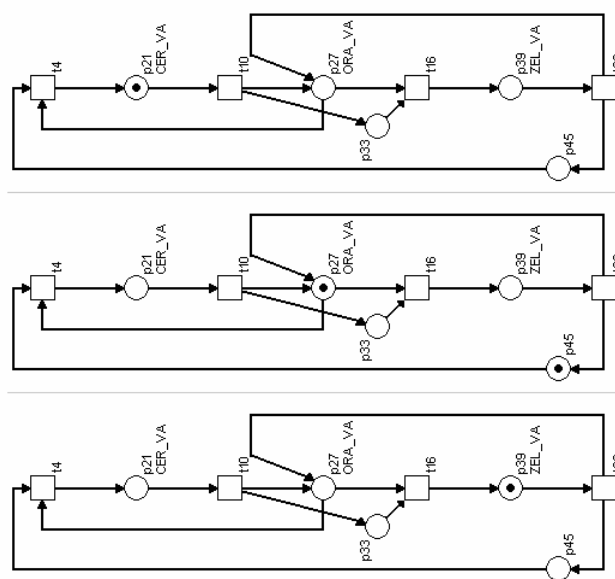


Obr. č. 12: Návrh řídicí logiky světelné křižovatky v P/T Petriho síti

V takto sestavené Petriho síti byl z důvodu zachování základního principu světelného řízení křižovatek proveden návrh řídicí logiky, jenž spočíval ve dvou etapách:

1. etapa - návrh posloupností světelných signálů na návěstidle.
2. etapa - návrh posloupností světelných signálů u jednotlivých návěstidel zajišťující přechody mezi fázemi.

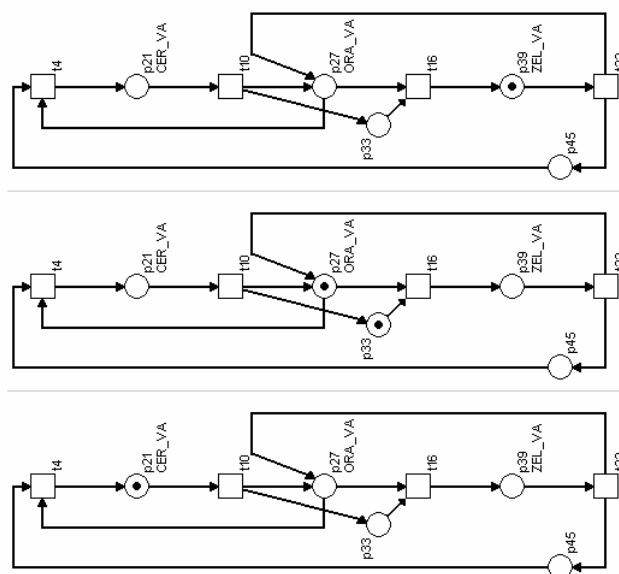
V první etapě bylo zajištěno, že po světelném signálu zeleného světla bude zařazen světelný signál oranžového světla a světelný signál červeného světla. Dále bylo zajištěno, že po světelném signálu červeného světla bude zařazen světelný signál oranžového světla a světelný signál zeleného světla. Na obrázku č. 13 a 14 je uvedeno, jak pomocí P/T Petriho sítě navrhnut správnou aktivaci návěstních znaků na návěstidle.



Obr. č. 13: Změna světelného signálu zeleného světla

Komentář k principu uvedeném na obr. č. 13:

Po světelném signálu zeleného světla $p39$ se prostřednictvím přechodu $t22$ přesouvá token do místa představujícího světelný signál oranžového světla $p27$ a doplňujícího místa $p45$, následně může dojít pouze k přechodu $t4$, při kterém se token přesouvá do místa představujícího světelný signál červeného světla $p21$.



Obr. č. 14: Změna světelného signálu červeného světla

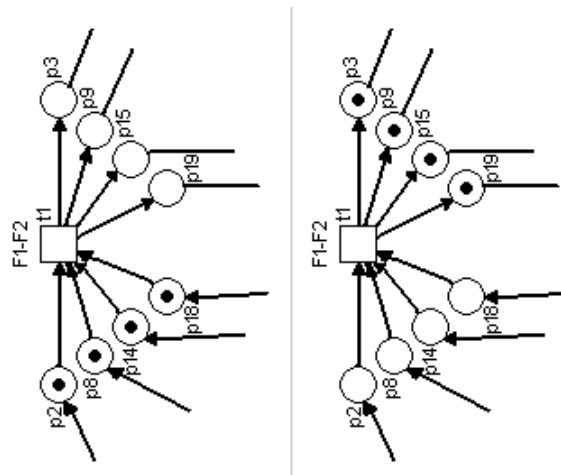
Komentář k principu uvedeném na obr. č. 14:

Po světelném signálu červeného světla $p21$ se prostřednictvím přechodu $t10$ přesouvá token do místa představujícího světelný signál oranžového světla $p27$ a doplňujícího místa $p33$, následně může dojít k přechodu $t16$, při kterém se token přesouvá do místa představujícího světelný signál zeleného světla $p39$.

V popsáných principech se vyskytují doplňující místa $p33$ a $p45$, která slouží k tomu, aby v daném časovém okamžiku mohly nastat pouze očekávané přechody, resp. očekávané změny světelných signálů. Nemůže tedy dojít k situaci, že po světelném signálu zeleného světla bude zařazen světelný signál oranžového světla a světelný signál zeleného světla, namísto červeného, resp. k situaci, že po světelném signálu červeného světla bude zařazen světelný signál oranžového světla a světelný signál červeného světla, namísto zeleného.

Kromě částí Petriho sítě zajišťujících řídicí logiku týkající se jednotlivých návěstidel v první, druhé a třetí fázi, se v sestavené Petriho síti nacházejí doplňující místa, jež zajišťují správnou funkci logiky řízení světelné křižovatky při přechodech mezi jednotlivými fázemi.

Ve druhé etapě bude zajištěno, aby signály zeleného světla v následující fázi mohly nastat až poté, co v předchozí fázi nastaly signály červeného světla, prostřednictvím principu uvedeného na obr. č. 15.



Obr. č. 15: Změna fáze

Komentář k principu uvedeném na obr. č. 15:

Současně s umístěním tokenů do míst představujících světelný signál červeného světla pro dopravní proudy, které vyskytují v předchozí fázi, se přesouvají tokeny také do doplňkových míst $p2$, $p8$, $p14$, $p18$, jež představují vstupní místa přechodu $t1$. Uskutečněním přechodu $t1$ je následně realizována změna fází. Po změně fází se nacházejí tokeny v doplňkových místech $p3$, $p9$, $p15$, $p19$, jež představují výstupní místa přechodu $t1$ a mohou tak nastat světelné signály zeleného světla pro dopravní proudy, které se vyskytují v následující fázi.

V popsaném principu se vyskytují doplňující místa $p2$, $p8$, $p14$, $p18$ a $p3$, $p9$, $p15$, $p19$, která slouží k tomu, aby v daném časovém okamžiku mohly nastat pouze očekávané přechody, resp. očekávané změny světelných signálů při přechodu mezi jednotlivými fázemi.

6. MODEL Y ZÁKLADNÍCH TYPŮ SILNĚ ZÁVISLÝCH KŘIŽOVATEK

Modely křižovatek byly vytvořeny pro dopravní proudy na stykových a průsečných křižovatkách. Při modelování byl v první fázi uvažován vstup nekoordinovaných proudů, ve druhé fázi byl zajišťován vstup koordinovaných proudů tak, aby předtím došlo k vyklizení koordinovaného úseku, a ve třetí fázi byl umožněn vstup dopravních proudů, které do koordinovaného úseku nesměřují.

Při koordinaci křižovatek byly zohledněny následující vstupní údaje:

- počet dopravních proudů,
- mezičasy,
- doby zelených,
- fázová schémata,
- koordinované proudy.

6.1 Parametry a proměnné

Před samotným modelováním jednotlivých variant budou uvedeny veličiny, které v rovnicích vystupují:

Proměnné veličiny:

$z_{P_i}(k)$ začátek zelené pro i -tý dopravní proud v k -té fázi, $P_i \in P$.

Konstantní veličiny:

P množina dopravních proudů,

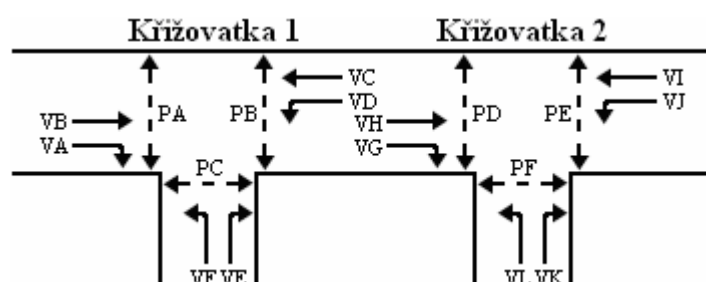
$t_{P_i}(k)$ doba zelené pro i -tý dopravní proud v k -té fázi, $P_i \in P$,

$m_{P_i P_j}$ mezičas mezi koncem vstupu i -tého proudu do křižovatky a začátkem vstupu j -tého proudu do křižovatky, $P_i \in P$, $P_j \in P$,

t_v vyklizovací doba koordinovaného úseku.

6.2 Modelování koordinace stykových křižovatek

Na stykových křižovatkách (obr. č. 16) mohou koordinované proudy vjíždět a vyjíždět v přímém směru, vjíždět a vyjíždět v přímém a odbočném směru nebo vjíždět a vyjíždět v odbočném směru. Proto byly modelovány tři varianty koordinace stykových křižovatek, do nichž vstupují dopravní proudy z množiny $P = \{VA, VB, \dots, PF\}$.



Obr. č. 16: Koordinované stykové křižovatky

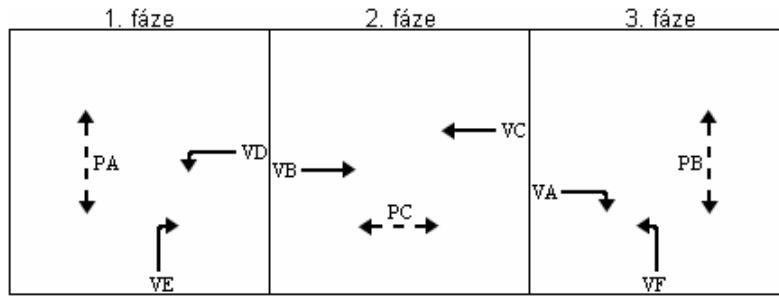
6.2.1 První varianta koordinace

V rámci první varianty byly koordinovány proudy vjíždějící do soustavy stykových křižovatek v přímém směru a vyjíždějící ze soustavy stykových křižovatek v přímém směru (viz. obr. č. 17).

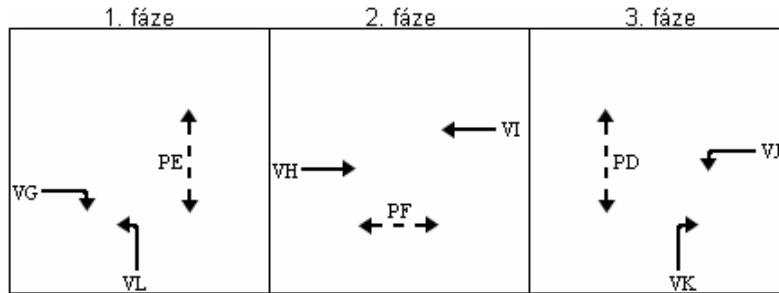


Obr. č. 17: První varianta koordinace stykových křižovatek

Max-plus model pro první variantu koordinace stykových křižovatek byl vytvořen s ohledem na navržená fázová schémata (obr. č. 18 a 19), která jsou předpokladem bezpečného vstupu všech dopravních proudů a koordinovaného vstupu vozidlových proudů VB, VH a VI, VC.



Obr. č. 18: Fázové schéma pro křižovatku 1



Obr. č. 19: Fázové schéma pro křižovatku 2

V první etapě bylo prostřednictvím rovnic (22) - (27) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující v první fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve třetí fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VD}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA},VD}, z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF},VD}, z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB},P_{VD}}) \quad (22)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = \max(z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB},P_{VE}}, \mathcal{E}) \quad (23)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA},P_{PA}}, z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF},P_{PA}}) \quad (24)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ},P_{VG}}, z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD},P_{VG}}) \quad (25)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ},P_{VL}}, z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD},P_{VL}}) \quad (26)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ},P_{PE}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK},P_{PE}}) \quad (27)$$

Ve druhé etapě bylo prostřednictvím rovnic (28) - (33) zajištěno, aby začátky zelených pro koordinované proudy umožnily plynulý průjezd koordinovaným úsekem a začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve druhé fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené v první fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VB}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VB}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{VB}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VB}}, \quad (28)$$

$$z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VH}} + t_v, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VH}} + t_v)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = \max(z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VC}}, \varepsilon) \quad (29)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{PC}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (30)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VH}}, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VH}}) \quad (31)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VI}}, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VI}}, \quad (32)$$

$$z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VC}} + t_v)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{PF}}, z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{PF}}) \quad (33)$$

Ve třetí etapě bylo prostřednictvím rovnic (34) - (39) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve třetí fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve druhé fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VA}}(k+1) = \max(z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VA}}, \varepsilon) \quad (34)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VF}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{VF}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VF}}) \quad (35)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{PB}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (36)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VJ}}, z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VJ}}) \quad (37)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VK}}, z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VK}}) \quad (38)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{PD}}, z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{PD}}) \quad (39)$$

Úpravou systému rovnic (22) - (39) byly sestaveny rovnice (40) - (57), které modelují začátky zelených pro koordinované a nekoordinované proudy při první variantě koordinace stykových křižovatek.

Max-plus model pro první variantu koordinace stykových křižovatek:

$$z_{P_{VD}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{VD}}) \oplus \quad (40)$$

$$\oplus (z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VD}})$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VE}} \quad (41)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{PA}}) \oplus (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{PA}}) \quad (42)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VG}}) \oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VG}}) \quad (43)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VL}}) \quad (44)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{PE}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{PE}}) \quad (45)$$

$$\begin{aligned} z_{P_{VB}}(k+1) = & (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{VB}}) \oplus \\ & \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VB}} \otimes t_v) \oplus \\ & \oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VB}} \otimes t_v) \end{aligned} \quad (46)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VC}} \quad (47)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{PC}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (48)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VH}}) \quad (49)$$

$$\begin{aligned} z_{P_{VI}}(k+1) = & (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VI}}) \oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VI}}) \oplus \\ & \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VC}} \otimes t_v) \end{aligned} \quad (50)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{PF}}) \oplus (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{PF}}) \quad (51)$$

$$z_{P_{VA}}(k+1) = z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VA}} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} z_{P_{VF}}(k+1) = & (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{VF}}) \oplus \\ & \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VF}}) \end{aligned} \quad (53)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{PB}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (54)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VJ}}) \quad (55)$$

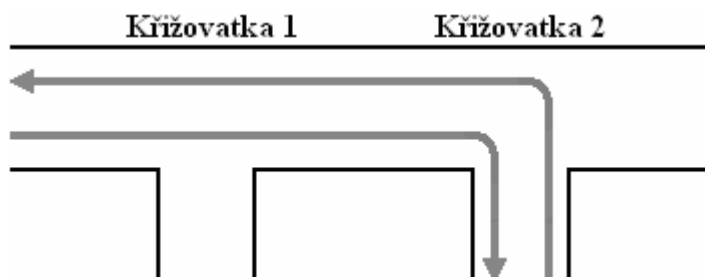
$$z_{P_{VK}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VK}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VK}}) \quad (56)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{PD}}) \oplus (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{PD}}) \quad (57)$$

Matice systému (58) max-plus modelu pro první variantu koordinace stykových křižovatek, na základě kterého byl vytvořen komunikační graf (obr. č. 20).

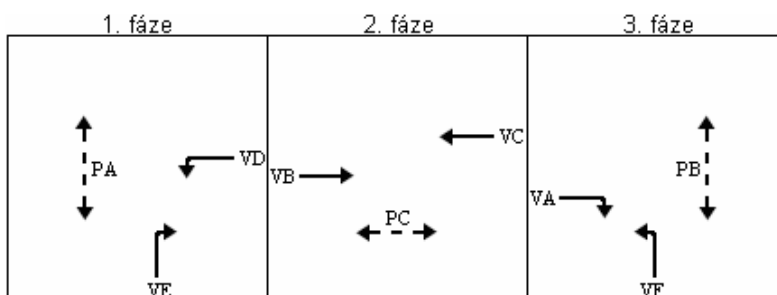
6.2.2 Druhá varianta koordinace

V rámci druhé varianty byly koordinovány proudy vjíždějící do soustavy stykových křižovatek v přímém, resp. odbočném směru a vyjíždějící ze soustavy stykových křižovatek v odbočném, resp. přímém směru (viz. obr. č. 21).

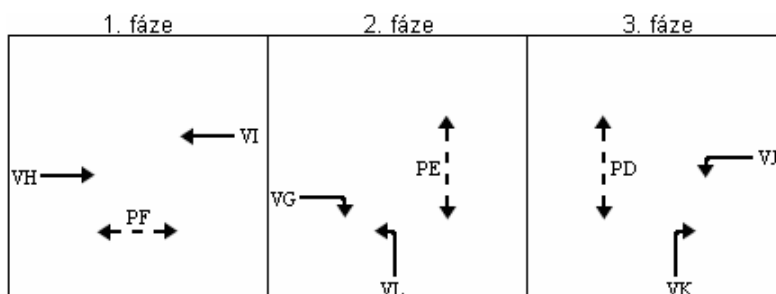


Obr. č. 21: Druhá varianta koordinace stykových křižovatek

Max-plus model pro druhou variantu koordinace stykových křižovatek byl vytvořen s ohledem na navržená fázová schémata (obr. č. 22 a 23), která jsou předpokladem bezpečného vstupu všech dopravních proudů a koordinovaného vstupu vozidlových proudů VB, VG a VL, VC.



Obr. č. 22: Fázové schéma pro křižovatku 1



Obr. č. 23: Fázové schéma pro křižovatku 2

V první etapě bylo prostřednictvím rovnic (59) - (64) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující v první fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve třetí fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VD}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{VD}}, z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{VD}}, z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB}, P_{VD}}) \quad (59)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = \max(z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB}, P_{VE}}, \varepsilon) \quad (60)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{PA}}, z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{PA}}) \quad (61)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VH}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{VH}}, z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (62)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = \max(z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VI}}, \varepsilon) \quad (63)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{PF}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (64)$$

Ve druhé etapě bylo prostřednictvím rovnic (65) - (70) zajištěno, aby začátky zelených pro koordinované proudy umožnily plynulý průjezd koordinovaným úsekem a začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve druhé fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené v první fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VB}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VB}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{VB}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VB}}, \quad (65)$$

$$z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VG}} + t_v)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = \max(z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VC}}, \varepsilon) \quad (66)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{PC}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (67)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = \max(z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VG}}, \varepsilon) \quad (68)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VL}}, z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{VL}}, z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VL}}, \quad (69)$$

$$z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VC}} + t_v)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{PE}}, z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{PE}}) \quad (70)$$

Ve třetí etapě bylo prostřednictvím rovnic (71) - (76) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve třetí fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve druhé fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VA}}(k+1) = \max(z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VA}}, \varepsilon) \quad (71)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VF}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{VF}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VF}}) \quad (72)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{PB}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (73)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{VJ}}, z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VJ}}, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VJ}}) \quad (74)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = \max(z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VK}}, \varepsilon) \quad (75)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{PD}}, z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{PD}}) \quad (76)$$

Úpravou systému rovnic (59) - (76) byly sestaveny rovnice (77) - (94), které modelují začátky zelených pro koordinované a nekoordinované proudy při druhé variantě koordinace stykových křižovatek.

Max-plus model pro druhou variantu koordinace stykových křižovatek:

$$z_{P_{VD}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VD}}) \quad (77)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VE}} \quad (78)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{PA}}) \oplus (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{PA}}) \quad (79)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (80)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VI}} \quad (81)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{PF}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (82)$$

$$z_{P_{VB}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, VL} \otimes t_v) \quad (83)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VC}} \quad (84)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{PC}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (85)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VG}} \quad (86)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VC}} \otimes t_v) \quad (87)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{PE}}) \oplus (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{PE}}) \oplus \quad (88)$$

$$z_{P_{VA}}(k+1) = z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VA}} \quad (89)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{VF}}) \oplus \quad (90)$$

$$\oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VF}})$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{PB}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (91)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VJ}}) \oplus \quad (92)$$

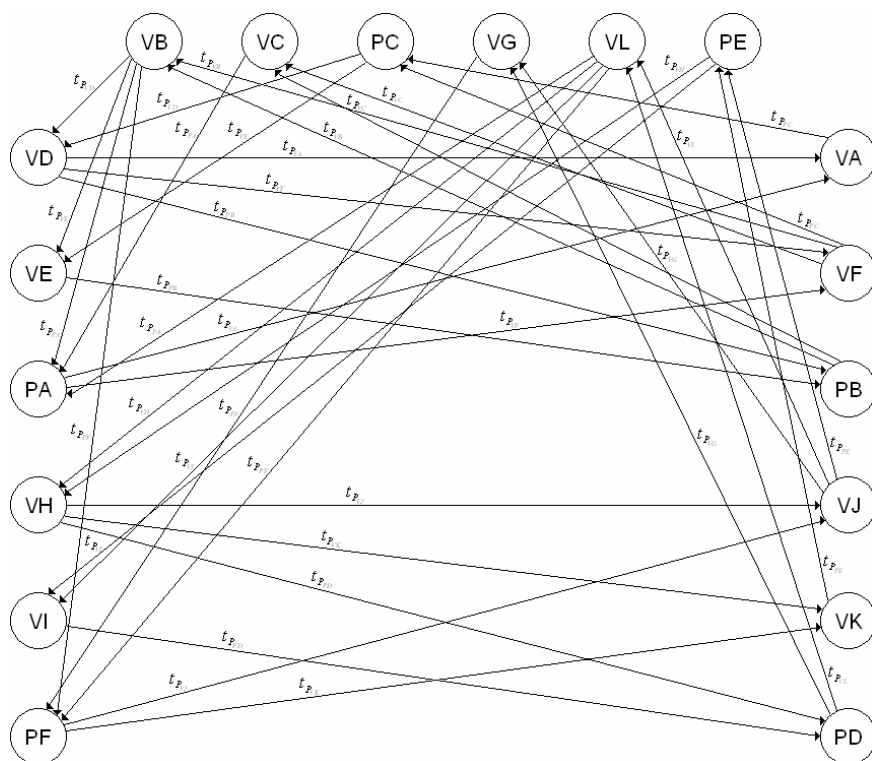
$$\oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VJ}})$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VK}} \quad (93)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{PD}}) \oplus (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{PD}}) \quad (94)$$

Matice systému (95) max-plus modelu pro druhou variantu koordinace stykových křižovatek, na základě kterého byl vytvořen komunikační graf (obr. č. 24).

$$\begin{array}{lll} A(P_{VD}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} & A(P_{VB}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} & A(P_{VA}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} \\ A(P_{VD}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} & A(P_{VB}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{VF}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} \\ A(P_{VD}, P_{PB}) = t_{P_{PB}} & A(P_{VB}, P_{PF}) = t_{P_{PF}} & A(P_{VF}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} \\ A(P_{VE}, P_{PB}) = t_{P_{PB}} & A(P_{VC}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{VF}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} \\ A(P_{PA}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} & A(P_{PC}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{PB}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} \\ A(P_{PA}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} & A(P_{PC}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} & A(P_{PB}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} \\ A(P_{VH}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} & A(P_{VG}, P_{PF}) = t_{P_{PF}} & A(P_{VJ}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} \\ A(P_{VH}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} & A(P_{VL}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{VJ}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} \\ A(P_{VH}, P_{PD}) = t_{P_{PD}} & A(P_{VL}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{VJ}, P_{PE}) = t_{P_{PE}} \\ A(P_{VI}, P_{PD}) = t_{P_{PD}} & A(P_{VL}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} & A(P_{VK}, P_{PE}) = t_{P_{PE}} \\ A(P_{PF}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} & A(P_{VL}, P_{PF}) = t_{P_{PF}} & A(P_{PD}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} \\ A(P_{PF}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} & A(P_{PE}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{PD}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} \\ A(P_{VB}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{PE}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} & \end{array} \quad (95)$$



Obr. č. 24: Komunikační graf pro druhou variantu koordinace stykových křižovatek

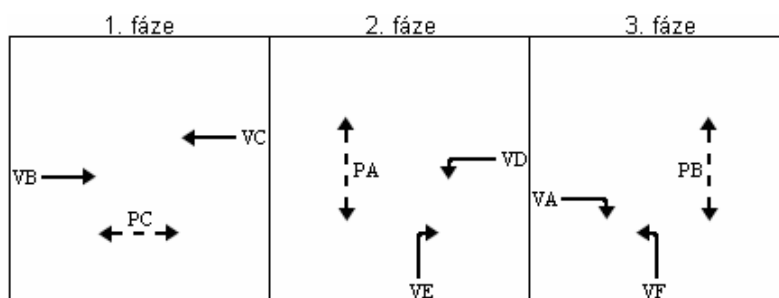
6.2.3 Třetí varianta koordinace

V rámci třetí varianty byly koordinovány proudy vjíždějící do soustavy stykových křižovatek v odbočném směru a vyjíždějící ze soustavy stykových křižovatek v odbočném směru (viz. obr. č. 25).

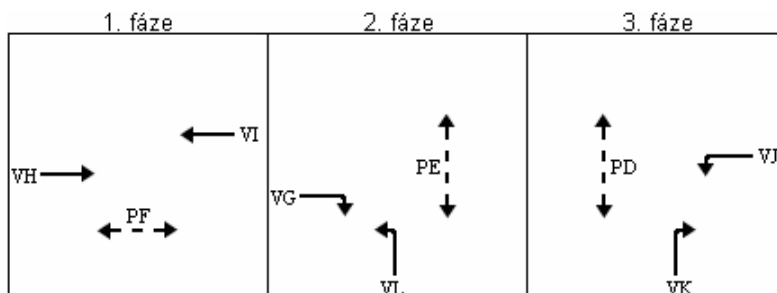


Obr. č. 25: Třetí varianta koordinace stykových křižovatek

Max-plus model pro třetí variantu koordinace stykových křižovatek byl vytvořen s ohledem na navržená fázová schémata (obr. č. 26 a 27), která jsou předpokladem bezpečného vstupu všech dopravních proudů a koordinovaného vstupu vozidlových proudů VE, VG a VL, VD.



Obr. č. 26: Fázové schéma pro křižovatku 1



Obr. č. 27: Fázové schéma pro křižovatku 2

V první etapě bylo prostřednictvím rovnic (96) - (101) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující v první fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve třetí fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VB}}(k+1) = \max(z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{VB}}, z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB}, P_{VB}}) \quad (96)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = \max(z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{VC}}, z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB}, P_{VC}}) \quad (97)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{PC}}, z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{PC}}) \quad (98)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VH}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{VH}}, z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (99)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = \max(z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VI}}, \varepsilon) \quad (100)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{PF}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (101)$$

Ve druhé etapě bylo prostřednictvím rovnic (102) - (107) zajištěno, aby začátky zelených pro koordinované proudy umožnily plynulý průjezd koordinovaným úsekem a začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve druhé fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené v první fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VD}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VD}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VD}}) \quad (102)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VE}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VE}}, \\ z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VG}} + t_v) \quad (103)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{PA}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{PA}}) \quad (104)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = \max(z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VG}} \mathcal{E}) \quad (105)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VL}}, z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{VL}}, z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VL}}, \\ z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VD}} + t_v, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VD}} + t_v) \quad (106)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{PE}}, z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{PE}}) \quad (107)$$

Ve třetí etapě bylo prostřednictvím rovnic (108) - (113) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve třetí fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve druhé fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VA}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VA}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VA}}) \quad (108)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VF}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VF}}) \quad (109)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{PB}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{PB}}) \quad (110)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{VJ}}, z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VJ}}, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VJ}}) \quad (111)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = \max(z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VK}}, \mathcal{E}) \quad (112)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{PD}}, z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{PD}}) \quad (113)$$

Úpravou systému rovnic (96) - (113) byly sestaveny rovnice (114) - (131), které modelují začátky zelených pro koordinované a nekoordinované proudy při třetí variantě koordinace stykových křižovatek.

Max-plus model pro třetí variantu koordinace stykových křižovatek:

$$z_{P_{VB}}(k+1) = (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VB}}) \quad (114)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{VC}}) \oplus (z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VC}}) \quad (115)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{PC}}) \oplus (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{PC}}) \quad (116)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (117)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VI}} \quad (118)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{PF}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (119)$$

$$z_{P_{VD}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VD}}) \quad (120)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VE}}) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VE}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VG}} \otimes t_v) \quad (121)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{PA}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{PA}}) \quad (122)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VG}} \quad (123)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VD}}) \otimes (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VD}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VD}} \otimes t_v) \otimes \quad (124)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{PE}}) \oplus (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{PE}}) \quad (125)$$

$$z_{P_{VA}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VA}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VA}}) \quad (126)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VF}}) \quad (127)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{PB}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{PB}}) \quad (128)$$

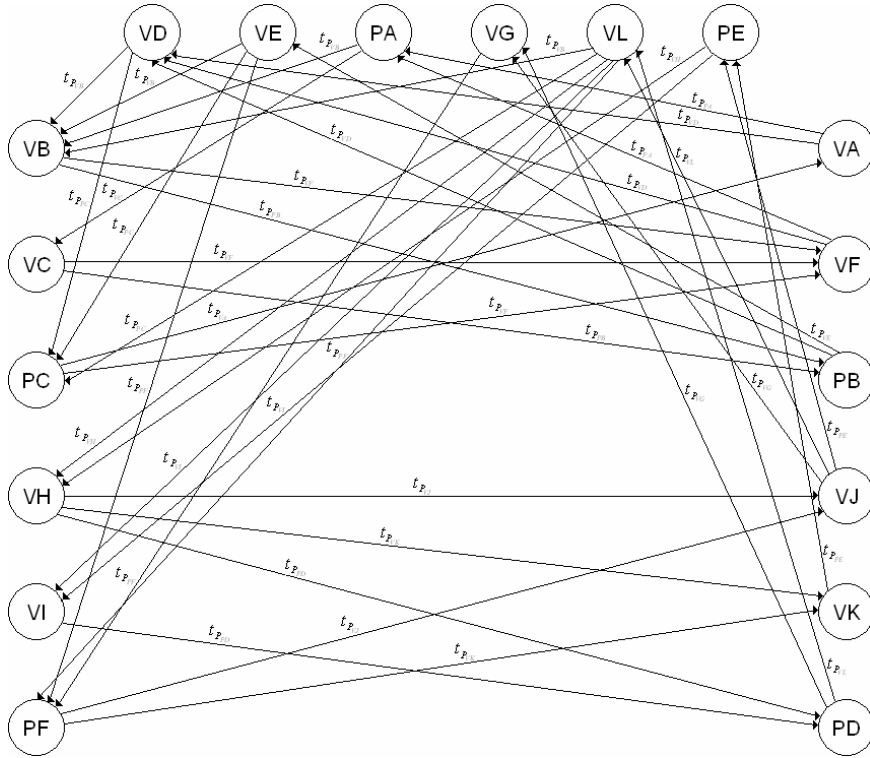
$$z_{P_{VJ}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VJ}}) \quad (129)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VK}} \quad (130)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{PD}}) \oplus (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{PD}}) \quad (131)$$

Matice systému (132) max-plus modelu pro třetí variantu koordinace stykových křižovatek, na základě kterého byl vytvořen komunikační graf (obr. č. 28).

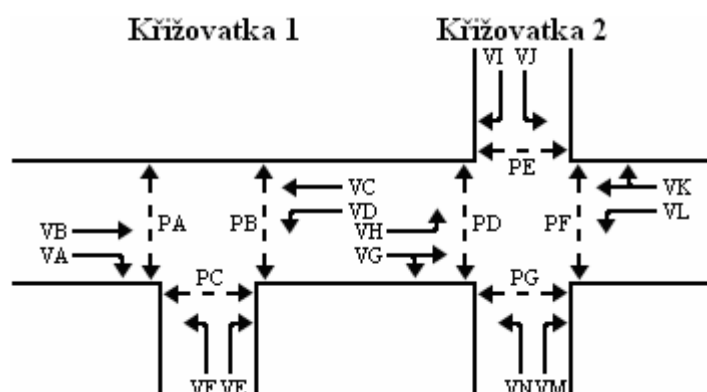
$$\begin{aligned}
A(P_{VB}, P_{VF}) &= t_{P_{VF}} & A(P_{VD}, P_{PC}) &= t_{P_{PC}} & A(P_{PE}, P_{VI}) &= t_{P_{VI}} \\
A(P_{VB}, P_{PB}) &= t_{P_{PB}} & A(P_{VE}, P_{VB}) &= t_{P_{VB}} & A(P_{VA}, P_{VD}) &= t_{P_{VD}} \\
A(P_{VC}, P_{VF}) &= t_{P_{VF}} & A(P_{VE}, P_{PC}) &= t_{P_{PC}} & A(P_{VA}, P_{PA}) &= t_{P_{PA}} \\
A(P_{VC}, P_{PB}) &= t_{P_{PB}} & A(P_{VE}, P_{PF}) &= t_{P_{PF}} & A(P_{VF}, P_{VD}) &= t_{P_{VD}} \\
A(P_{PC}, P_{VA}) &= t_{P_{VA}} & A(P_{PA}, P_{VB}) &= t_{P_{VB}} & A(P_{VF}, P_{PA}) &= t_{P_{PA}} \\
A(P_{PC}, P_{VF}) &= t_{P_{VF}} & A(P_{PA}, P_{VC}) &= t_{P_{VC}} & A(P_{PB}, P_{VD}) &= t_{P_{VD}} \\
A(P_{VH}, P_{VJ}) &= t_{P_{VJ}} & A(P_{VG}, P_{PF}) &= t_{P_{PF}} & A(P_{PB}, P_{VE}) &= t_{P_{VE}} \\
A(P_{VH}, P_{VK}) &= t_{P_{VK}} & A(P_{VL}, P_{VB}) &= t_{P_{VB}} & A(P_{VJ}, P_{VG}) &= t_{P_{VG}} \\
A(P_{VH}, P_{PD}) &= t_{P_{PD}} & A(P_{VL}, P_{PC}) &= t_{P_{PC}} & A(P_{VJ}, P_{VL}) &= t_{P_{VL}} \\
A(P_{VI}, P_{PD}) &= t_{P_{PD}} & A(P_{VL}, P_{VH}) &= t_{P_{VH}} & A(P_{VJ}, P_{PE}) &= t_{P_{PE}} \\
A(P_{PF}, P_{VJ}) &= t_{P_{VJ}} & A(P_{VL}, P_{VI}) &= t_{P_{VI}} & A(P_{VK}, P_{PE}) &= t_{P_{PE}} \\
A(P_{PF}, P_{VK}) &= t_{P_{VK}} & A(P_{VL}, P_{PF}) &= t_{P_{PF}} & A(P_{PD}, P_{VG}) &= t_{P_{VG}} \\
A(P_{VD}, P_{VB}) &= t_{P_{VB}} & A(P_{PE}, P_{VH}) &= t_{P_{VH}} & A(P_{PD}, P_{VL}) &= t_{P_{VL}}
\end{aligned} \tag{132}$$



Obr. č. 28: Komunikační graf pro třetí variantu koordinace stykových křižovatek

6.3 Modelování koordinace stykové a průsečné křižovatky

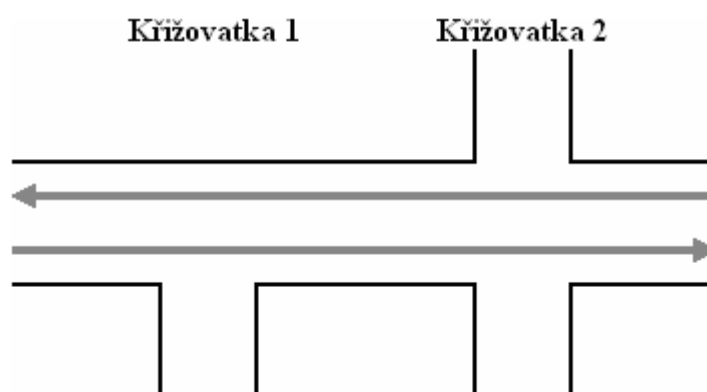
Na stykové a průsečné křižovatce (obr. č. 29) mohou koordinované proudy vjíždět a vyjíždět v přímém směru, vjíždět a vyjíždět v přímém a odbočném směru nebo vjíždět a vyjíždět v odbočném směru. Proto byly modelovány tři varianty koordinace stykové a průsečné křižovatky, do nichž vstupují dopravní proudy z množiny $P = \{VA, VB, \dots, PG\}$.



Obr. č. 29: Koordinovaná styková a průsečná křižovatka

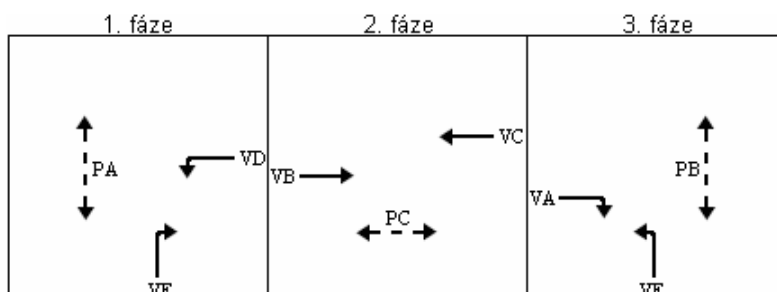
6.3.1 První varianta koordinace

V rámci první varianty byly koordinovány proudy vjíždějící do soustavy stykové a průsečné křižovatky v přímém směru a vyjíždějící ze soustavy stykové a průsečné křižovatky v přímém směru (viz. obr. č. 30).

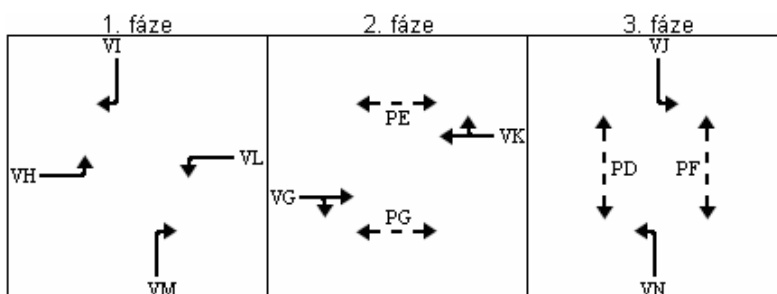


Obr. č. 30: První varianta koordinace stykové a průsečné křižovatky

Max-plus model pro první variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky byl vytvořen s ohledem na navržená fázová schémata (obr. č. 31 a 32), která jsou předpokladem bezpečného vstupu všech dopravních proudů a koordinovaného vstupu vozidlových proudů VB, VG a VK, VC.



Obr. č. 31: Fázové schéma pro křižovatku 1



Obr. č. 32: Fázové schéma pro křižovatku 2

V první etapě bylo prostřednictvím rovnic (133) - (139) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující v první fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve třetí fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VD}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{VD}}, z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{VD}}, z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB}, P_{VD}}) \quad (133)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = \max(z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB}, P_{VE}}, \mathcal{E}) \quad (134)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{PA}}, z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{PA}}) \quad (135)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VH}}, z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VH}}, z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (136)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = \max(z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VI}}, z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VI}}) \quad (137)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VL}}, z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VL}}, z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VL}}) \quad (138)$$

$$z_{P_{VM}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VM}}, z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VM}}) \quad (139)$$

Ve druhé etapě bylo prostřednictvím rovnic (140) - (146) zajištěno, aby začátky zelených pro koordinované proudy umožnily plynulý průjezd koordinovaným úsekem a začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve druhé fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené v první fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VB}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VB}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{VB}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VB}}, \quad (140)$$

$$z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VG}} + t_v, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{VG}} + t_v)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = \max(z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VC}}, \epsilon) \quad (141)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{PC}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (142)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VG}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{VG}}) \quad (143)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VK}}, z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{VK}}, \quad (144)$$

$$z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VC}} + t_v)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{PE}}, z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{PE}}) \quad (145)$$

$$z_{P_{PG}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{PG}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{PG}}) \quad (146)$$

Ve třetí etapě bylo prostřednictvím rovnic (147) - (153) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve třetí fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve druhé fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VA}}(k+1) = \max(z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VA}}, \epsilon) \quad (147)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VF}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{VF}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VF}}) \quad (148)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{PB}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (149)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{VJ}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{VJ}}, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VJ}}) \quad (150)$$

$$z_{P_{VN}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{VN}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{VN}}, z_{P_{PG}}(k) + t_{P_{PG}} + m_{P_{PG}, P_{VN}}) \quad (151)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{PD}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{PD}}) \quad (152)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{PF}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (153)$$

Úpravou systému rovnic (133) - (153) byly sestaveny rovnice (154) - (174), které modelují začátky zelených pro koordinované a nekoordinované proudy při první variantě koordinace stykové a průsečné křižovatky.

Max-plus model pro první variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky:

$$z_{P_{VD}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VD}}) \quad (154)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VE}} \quad (155)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{PA}}) \oplus (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{PA}}) \quad (156)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (157)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VI}}) \oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VI}}) \quad (158)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VL}}) \quad (159)$$

$$z_{P_{VM}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VM}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VM}}) \quad (160)$$

$$z_{P_{VB}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VG}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{VG}} \otimes t_v) \quad (161)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VC}} \quad (162)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{PC}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (163)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VG}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{VG}}) \quad (164)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VK}}) \oplus (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{VK}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VC}} \otimes t_v) \quad (165)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{PE}}) \oplus (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{PE}}) \quad (166)$$

$$z_{P_{PG}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{PG}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{PG}}) \quad (167)$$

$$z_{P_{VA}}(k+1) = z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VA}} \quad (168)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VF}}) \quad (169)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{PB}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (170)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{VJ}}) \oplus \quad (171)$$

$$\oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VJ}})$$

$$z_{P_{VN}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{VN}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{VN}}) \oplus \quad (172)$$

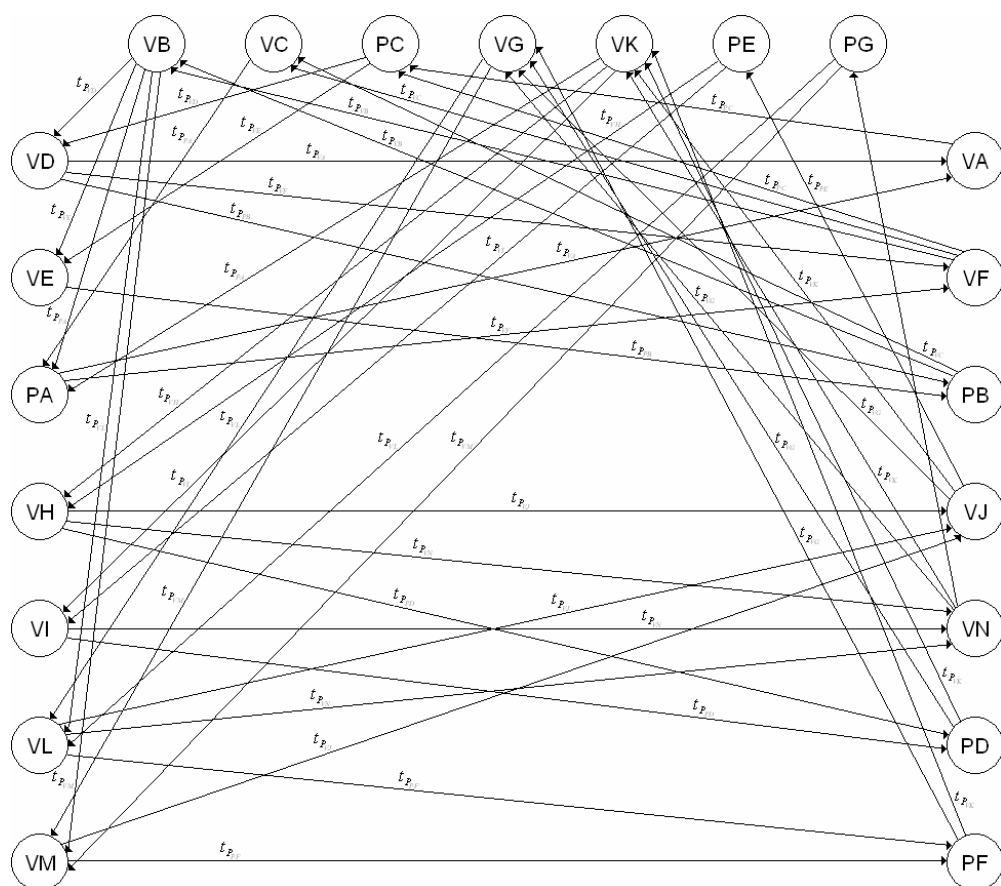
$$\oplus (z_{P_{PG}}(k) \otimes t_{P_{PG}} \otimes m_{P_{PG}, P_{VN}})$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{PD}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{PD}}) \quad (173)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{PF}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (174)$$

Matice systému (175) max-plus modelu pro první variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky, na základě kterého byl vytvořen komunikační graf (obr. č. 33).

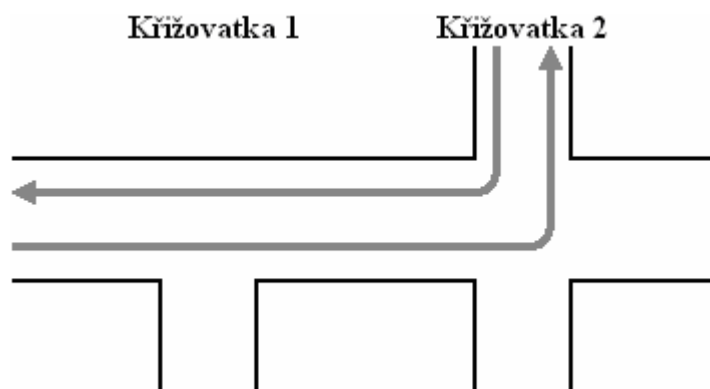
$$\begin{array}{lll} A(P_{VD}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} & A(P_{VB}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} & A(P_{VF}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} \\ A(P_{VD}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} & A(P_{VB}, P_{PA}) = t_{P_{VD}} & A(P_{VF}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} \\ A(P_{VD}, P_{PB}) = t_{P_{PB}} & A(P_{VB}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} & A(P_{VF}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} \\ A(P_{VE}, P_{PB}) = t_{P_{PB}} & A(P_{VB}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} & A(P_{PB}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} \\ A(P_{PA}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} & A(P_{VC}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{PB}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} \\ A(P_{PA}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} & A(P_{PC}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{VJ}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} \\ A(P_{VH}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} & A(P_{PC}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} & A(P_{VJ}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} \\ A(P_{VH}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{VG}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} & A(P_{VJ}, P_{PE}) = t_{P_{PE}} \\ A(P_{VH}, P_{PD}) = t_{P_{PD}} & A(P_{VG}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} & A(P_{VN}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} \\ A(P_{VI}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{VK}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{VN}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} \\ A(P_{VI}, P_{PD}) = t_{P_{PD}} & A(P_{VK}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{VN}, P_{PG}) = t_{P_{PG}} \\ A(P_{VL}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} & A(P_{VK}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} & A(P_{PD}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} \\ A(P_{VL}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{PE}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{PD}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} \\ A(P_{VL}, P_{PF}) = t_{P_{PF}} & A(P_{PE}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} & A(P_{PF}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} \\ A(P_{VM}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} & A(P_{PG}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} & A(P_{PF}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} \\ A(P_{VM}, P_{PF}) = t_{P_{PF}} & A(P_{PG}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} & \\ A(P_{VB}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{VA}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} & \end{array} \quad (175)$$



Obr. č. 33: Komunikační graf pro první variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky

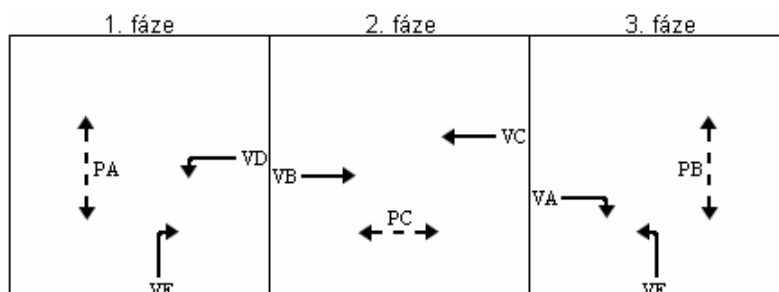
6.3.2 Druhá varianta koordinace

V rámci druhé varianty byly koordinovány proudy vjíždějící do soustavy stykové a průsečné křižovatky v přímém, resp. odbočném směru a vyjíždějící ze soustavy stykové a průsečné křižovatky v odbočném, resp. přímém směru (viz. obr. č. 34).

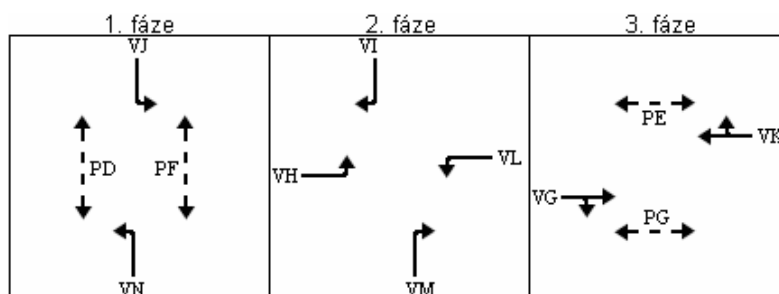


Obr. č. 34: Druhá varianta koordinace stykové a průsečné křižovatky

Max-plus model pro druhou variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky byl vytvořen s ohledem na navržená fázová schémata (obr. č. 35 a 36), která jsou předpokladem bezpečného vstupu všech dopravních proudů a koordinovaného vstupu vozidlových proudů VB, VH a VI, VC.



Obr. č. 35: Fázové schéma pro křižovatku 1



Obr. č. 36: Fázové schéma pro křižovatku 2

V první etapě bylo prostřednictvím rovnic (176) - (182) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující v první fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve třetí fázi a dodržení příslušných mezičasuů.

$$z_{P_{VD}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{VD}}, z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{VD}}, z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB}, P_{VD}}) \quad (176)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = \max(z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB}, P_{VE}}, \varepsilon) \quad (177)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{PA}}, z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{PA}}) \quad (178)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{VJ}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{VJ}}, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VJ}}) \quad (179)$$

$$z_{P_{VN}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{VN}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{VN}}, z_{P_{PG}}(k) + t_{P_{PG}} + m_{P_{PG}, P_{VN}}) \quad (180)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{PD}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{PD}}) \quad (181)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{PF}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (182)$$

Ve druhé etapě bylo prostřednictvím rovnic (183) - (189) zajištěno, aby začátky zelených pro koordinované proudy umožnily plynulý průjezd koordinovaným úsekem a začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve druhé fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené v první fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VB}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VB}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{VB}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VB}}, \quad (183)$$

$$z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VH}} + t_v, z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VH}} + t_v,$$

$$z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VH}} + t_v)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = \max(z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VC}}, \mathcal{E}) \quad (184)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{PC}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (185)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VH}}, z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VH}}, z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (186)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = \max(z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VI}}, z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VI}}, \quad (187)$$

$$z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VC}} + t_v)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VL}}, z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VL}}, z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VL}}) \quad (188)$$

$$z_{P_{VM}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VM}}, z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VM}}) \quad (189)$$

Ve třetí etapě bylo prostřednictvím rovnic (190) - (196) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve třetí fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve druhé fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VA}}(k+1) = \max(z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VA}}, \mathcal{E}) \quad (190)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VF}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{VF}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VF}}) \quad (191)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{PB}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (192)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VG}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{VG}}) \quad (193)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VK}}, z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{VK}}) \quad (194)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{PE}}, z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{PE}}) \quad (195)$$

$$z_{P_{PG}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{PG}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{PG}}) \quad (196)$$

Úpravou systému rovnic (176) - (196) byly sestaveny rovnice (197) - (217), které modelují začátky zelených pro koordinované a nekoordinované proudy při druhé variantě koordinace stykové a průsečné křižovatky.

Max-plus model pro druhou variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky:

$$z_{P_{VD}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VD}}) \quad (197)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VE}} \quad (198)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{PA}}) \oplus (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{PA}}) \quad (199)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VJ}}) \quad (200)$$

$$z_{P_{VN}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{VN}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{VN}}) \oplus (z_{P_{PG}}(k) \otimes t_{P_{PG}} \otimes m_{P_{PG}, P_{VN}}) \quad (201)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{PD}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{PD}}) \quad (202)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{PF}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (203)$$

$$z_{P_{VB}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VB}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VB}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VB}} \otimes t_v) \quad (204)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VC}} \quad (205)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{PC}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (206)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (207)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VI}}) \oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VI}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VI}} \otimes t_v) \quad (208)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VL}}) \quad (209)$$

$$z_{P_{VM}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VM}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VM}}) \quad (210)$$

$$z_{P_{VA}}(k+1) = z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VA}} \quad (211)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VF}}) \quad (212)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{PB}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (213)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VG}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{VG}}) \quad (214)$$

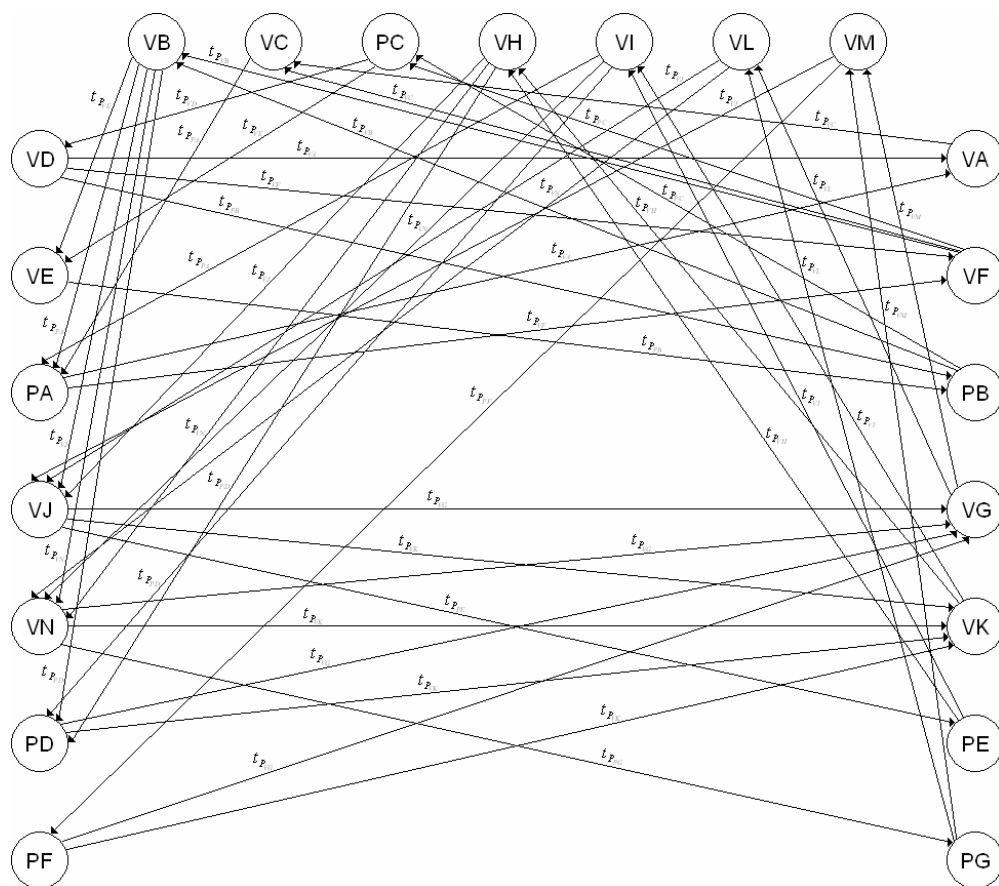
$$z_{P_{VK}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VK}}) \oplus (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{VK}}) \quad (215)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{PE}}) \oplus (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{PE}}) \quad (216)$$

$$z_{P_{PG}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{PG}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{PG}}) \quad (217)$$

Matice systému (218) max-plus modelu pro druhou variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky, na základě kterého byl vytvořen komunikační graf (obr. č. 37).

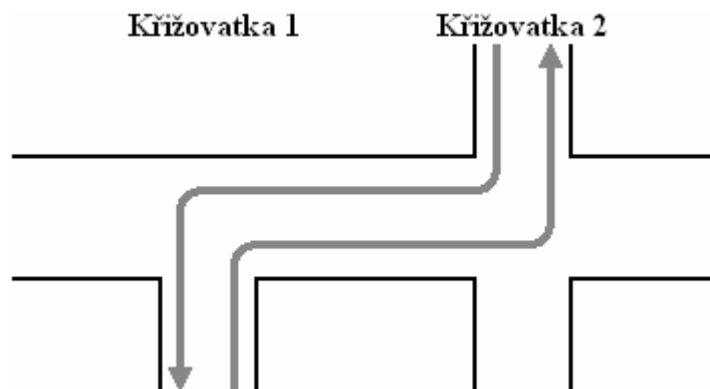
$$\begin{array}{lll} A(P_{VD}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} & A(P_{VB}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} & A(P_{VM}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} \\ A(P_{VD}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} & A(P_{VB}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{VM}, P_{PF}) = t_{P_{PF}} \\ A(P_{VD}, P_{PB}) = t_{P_{PB}} & A(P_{VB}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} & A(P_{VA}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} \\ A(P_{VE}, P_{PB}) = t_{P_{PB}} & A(P_{VB}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{VF}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} \\ A(P_{PA}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} & A(P_{VB}, P_{PD}) = t_{P_{PD}} & A(P_{VF}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} \\ A(P_{PA}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} & A(P_{VC}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{VF}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} \\ A(P_{VJ}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} & A(P_{PC}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{PB}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} \\ A(P_{VJ}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} & A(P_{PC}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} & A(P_{PB}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} \\ A(P_{VJ}, P_{PE}) = t_{P_{PE}} & A(P_{VH}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} & A(P_{VG}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} \\ A(P_{VN}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} & A(P_{VH}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{VG}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} \\ A(P_{VN}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} & A(P_{VH}, P_{PD}) = t_{P_{PD}} & A(P_{VK}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} \\ A(P_{VN}, P_{PG}) = t_{P_{PG}} & A(P_{VI}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{VK}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} \\ A(P_{PD}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} & A(P_{VI}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{PE}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} \\ A(P_{PD}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} & A(P_{VI}, P_{PD}) = t_{P_{PD}} & A(P_{PE}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} \\ A(P_{PF}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} & A(P_{VL}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} & A(P_{PG}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} \\ A(P_{PF}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} & A(P_{VL}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{PG}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} \\ A(P_{VB}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{VL}, P_{PF}) = t_{P_{PF}} & \end{array} \quad (218)$$



Obr. č. 37: Komunikační graf pro druhou variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky

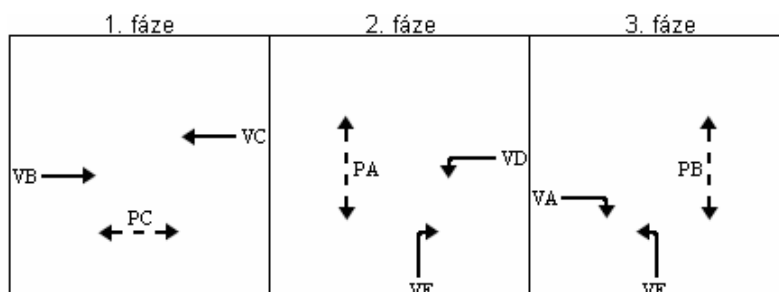
6.3.3 Třetí varianta koordinace

V rámci třetí varianty byly koordinovány proudy vjíždějící do soustavy stykové a průsečné křižovatky v odbočném směru a vyjíždějící ze soustavy stykové a průsečné křižovatky v odbočném směru (viz. obr. č. 38).

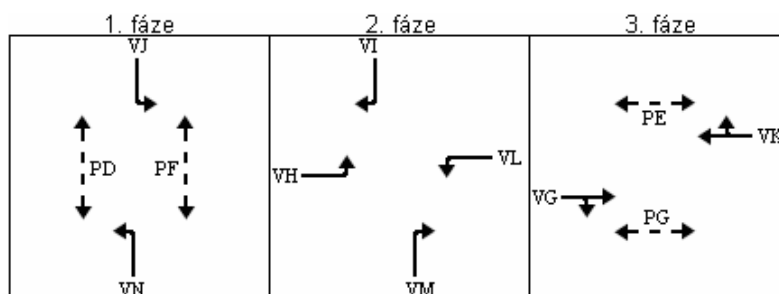


Obr. č. 38: Třetí varianta koordinace stykové a průsečné křižovatky

Max-plus model pro třetí variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky byl vytvořen s ohledem na navržená fázová schémata (obr. č. 39 a 40), která jsou předpokladem bezpečného vstupu všech dopravních proudů a koordinovaného vstupu vozidlových proudů VE, VH a VI, VD.



Obr. č. 39: Fázové schéma pro křižovatku 1



Obr. č. 40: Fázové schéma pro křižovatku 2

V první etapě bylo prostřednictvím rovnic (219) - (225) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující v první fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve třetí fázi a dodržení příslušných mezičasuů.

$$z_{P_{VB}}(k+1) = \max(z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{VB}}, z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB}, P_{VB}}) \quad (219)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = \max(z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{VC}}, z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB}, P_{VC}}) \quad (220)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{PC}}, z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{PC}}) \quad (221)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{VJ}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{VJ}}, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VJ}}) \quad (222)$$

$$z_{P_{VN}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{VN}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{VN}}, z_{P_{PG}}(k) + t_{P_{PG}} + m_{P_{PG}, P_{VN}}) \quad (223)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{PD}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{PD}}) \quad (224)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{PF}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (225)$$

Ve druhé etapě bylo prostřednictvím rovnic (226) - (232) zajištěno, aby začátky zelených pro koordinované proudy umožnily plynulý průjezd koordinovaným úsekem a začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve druhé fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené v první fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VD}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VD}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VD}}) \quad (226)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VE}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VE}}, \quad (227)$$

$$z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VH}} + t_v, z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VH}} + t_v, \\ z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VH}} + t_v)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{PA}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{PA}}) \quad (228)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VH}}, z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VH}}, z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (229)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = \max(z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VI}}, z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VI}}, \quad (230)$$

$$z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VD}} + t_v, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VD}} + t_v)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VL}}, z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VL}}, z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VL}}) \quad (231)$$

$$z_{P_{VM}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VM}}, z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VM}}) \quad (232)$$

Ve třetí etapě bylo prostřednictvím rovnic (233) - (239) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve třetí fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve druhé fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VA}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VA}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VA}}) \quad (233)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VF}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VF}}) \quad (234)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{PB}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{PD}}) \quad (235)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VG}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{VG}}) \quad (236)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VK}}, z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{VK}}) \quad (237)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{PE}}, z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{PE}}) \quad (238)$$

$$z_{P_{PG}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{PG}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{PG}}) \quad (239)$$

Úpravou systému rovnic (219) - (239) byly sestaveny rovnice (240) - (260), které modelují začátky zelených pro koordinované a nekoordinované proudy při třetí variantě koordinace stykové a průsečné křižovatky.

Max-plus model pro třetí variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky:

$$z_{P_{VB}}(k+1) = (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{PB}}) \oplus (z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VB}}) \oplus \quad (240)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{VC}}) \oplus (z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VC}}) \quad (241)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{PC}}) \oplus (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{PC}}) \quad (242)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{VJ}}) \oplus \quad (243)$$

$$\oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VJ}})$$

$$z_{P_{VN}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{VN}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{VN}}) \oplus \quad (244)$$

$$\oplus (z_{P_{PG}}(k) \otimes t_{P_{PG}} \otimes m_{P_{PG}, P_{VN}})$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{PD}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{PD}}) \quad (245)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{PF}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (246)$$

$$z_{P_{VD}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VD}}) \quad (247)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VE}}) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VE}}) \oplus \quad (248)$$

$$\oplus (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{PH}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VH}}) \oplus$$

$$\oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VH}} \otimes t_v)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{PA}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{PA}}) \quad (249)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VH}}) \oplus \quad (250)$$

$$\oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VH}})$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VI}}) \oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VI}}) \oplus \quad (251)$$

$$\oplus (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VD}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{PC}} \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VD}} \otimes t_v)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VL}}) \oplus \quad (252)$$

$$\oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VL}})$$

$$z_{P_{VM}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VM}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VM}}) \quad (253)$$

$$z_{P_{VA}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VA}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VA}}) \quad (254)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VF}}) \quad (255)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{PB}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{PB}}) \quad (256)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VG}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{VG}}) \quad (257)$$

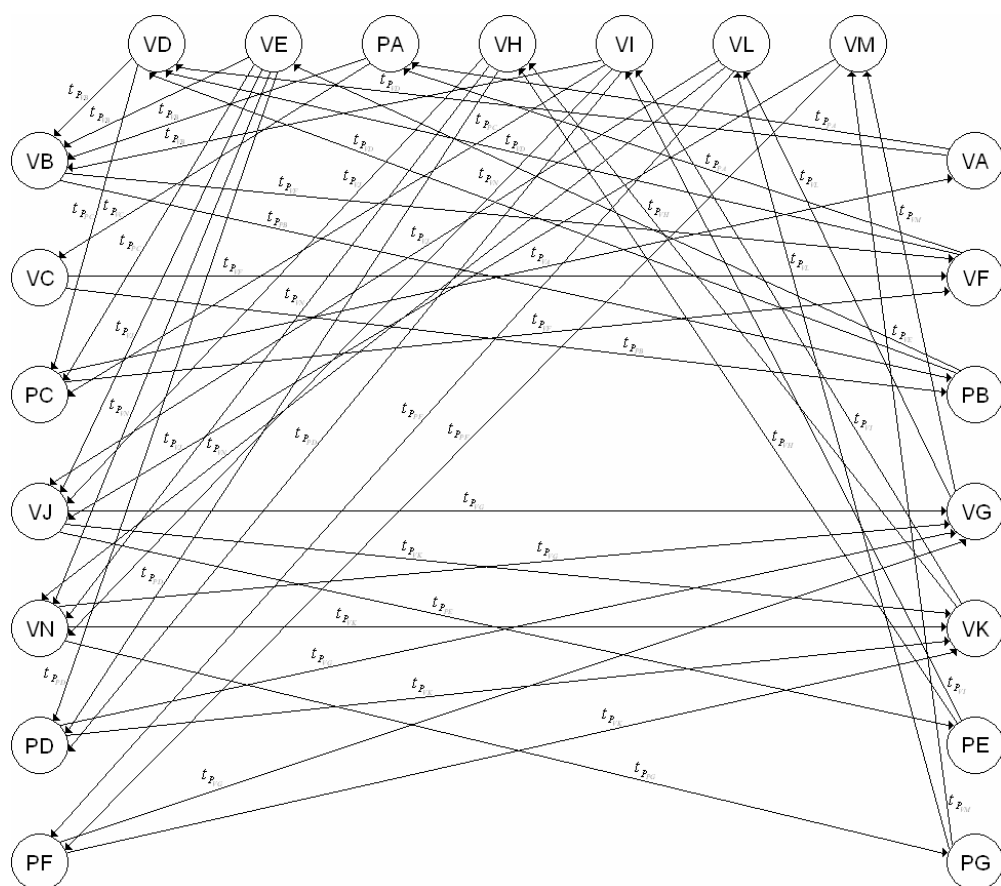
$$z_{P_{VK}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VK}}) \oplus (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{VK}}) \quad (258)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{PE}}) \oplus (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{PE}}) \quad (259)$$

$$z_{P_{PG}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{PG}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{PG}}) \quad (260)$$

Matice systému (261) max-plus modelu pro druhou variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky, na základě kterého byl vytvořen komunikační graf (obr. č. 41).

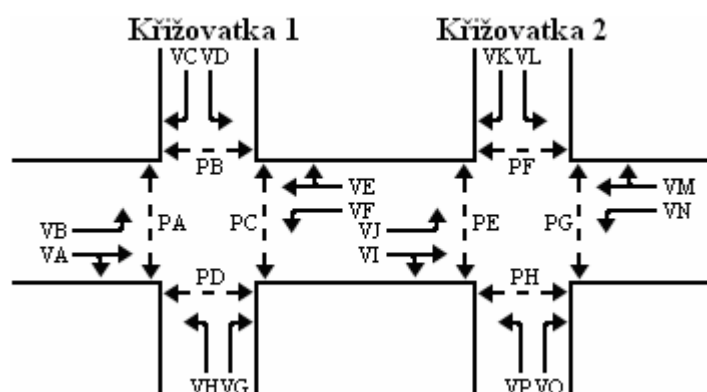
$$\begin{array}{lll}
A(P_{VB}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} & A(P_{VD}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} & A(P_{VL}, P_{PF}) = t_{P_{PF}} \\
A(P_{VB}, P_{PB}) = t_{P_{PB}} & A(P_{VE}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} & A(P_{VM}, P_{VJ}) = t_{P_{PF}} \\
A(P_{VC}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} & A(P_{VE}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} & A(P_{VM}, P_{PF}) = t_{P_{PF}} \\
A(P_{VC}, P_{PB}) = t_{P_{PB}} & A(P_{VE}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} & A(P_{VA}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} \\
A(P_{PC}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} & A(P_{VE}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{VA}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} \\
A(P_{PC}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} & A(P_{VE}, P_{PD}) = t_{P_{PD}} & A(P_{VF}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} \\
A(P_{VJ}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} & A(P_{PA}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} & A(P_{VF}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} \\
A(P_{VJ}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} & A(P_{PA}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} & A(P_{PB}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} \\
A(P_{VJ}, P_{PE}) = t_{P_{PE}} & A(P_{VH}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} & A(P_{PB}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} \\
A(P_{VN}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} & A(P_{VH}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{VG}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} \\
A(P_{VN}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} & A(P_{VH}, P_{PD}) = t_{P_{PD}} & A(P_{VG}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} \\
A(P_{VN}, P_{PG}) = t_{P_{PG}} & A(P_{VI}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} & A(P_{VK}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} \\
A(P_{PD}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} & A(P_{VI}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} & A(P_{VK}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} \\
A(P_{PD}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} & A(P_{VI}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{PE}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} \\
A(P_{PF}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} & A(P_{VI}, P_{PD}) = t_{P_{PD}} & A(P_{PE}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} \\
A(P_{PF}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} & A(P_{VL}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} & A(P_{PG}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} \\
A(P_{VD}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} & A(P_{VL}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{PG}, P_{VM}) = t_{P_{VM}}
\end{array} \quad (261)$$



Obr. č. 41: Komunikační graf pro třetí variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky

6.4 Modelování koordinace průsečných křižovatek

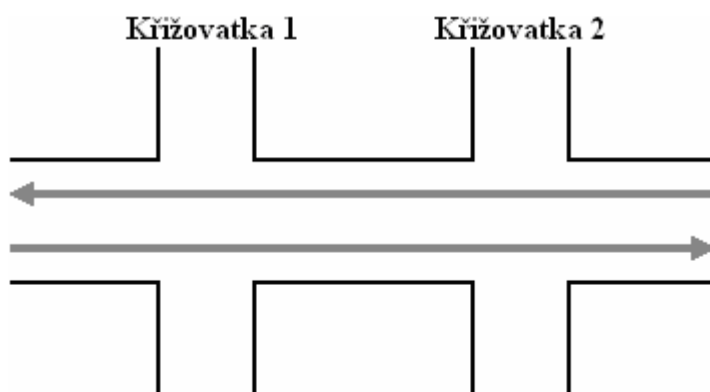
Na průsečných křižovatkách (obr č. 42) mohou koordinované proudy vjíždět a vyjíždět v přímém směru, vjíždět a vyjíždět v přímém a odbočném směru nebo vjíždět a vyjíždět v odbočném směru. Proto byly modelovány tři varianty koordinace průsečných křižovatek, do nichž vstupují dopravní proudy z množiny $P = \{VA, VB, \dots, PH\}$.



Obr. č. 42: Koordinované průsečné křižovatky

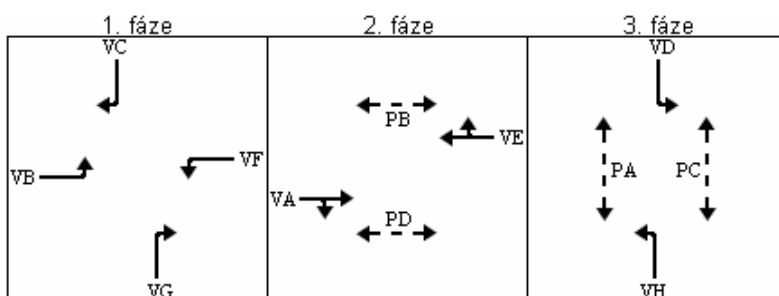
6.4.1 První varianta koordinace

V rámci první varianty byly koordinovány proudy vjíždějící do soustavy průsečných křižovatek v přímém směru a vyjíždějící ze soustavy průsečných křižovatek v přímém směru (viz. obr. č. 43).

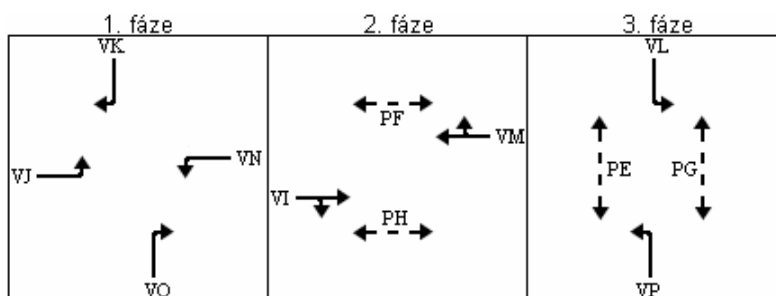


Obr. č. 43: První varianta koordinace průsečných křižovatek

Max-plus model pro první variantu koordinace průsečných křižovatek byl vytvořen s ohledem na navržená fázová schémata (obr. č. 44 a 45), která jsou předpokladem bezpečného vstupu všech dopravních proudů a koordinovaného vstupu vozidlových proudů VB, VH a VM, VE.



Obr. č. 44: Fázové schéma pro křižovatku 1



Obr. č. 45: Fázové schéma pro křižovatku 2

V první etapě bylo prostřednictvím rovnic (262) - (269) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující v první fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve třetí fázi a dodržení příslušných mezičasuů.

$$z_{P_{VB}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VB}}, z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VB}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VB}}) \quad (262)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VC}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VC}}) \quad (263)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VF}}, z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VF}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VF}}) \quad (264)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VG}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VG}}) \quad (265)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VJ}}, z_{P_{VP}}(k) + t_{P_{VP}} + m_{P_{VP}, P_{VJ}}, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VJ}}) \quad (266)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = \max(z_{P_{VP}}(k) + t_{P_{VP}} + m_{P_{VP}, P_{VK}}, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VK}}) \quad (267)$$

$$z_{P_{VN}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VN}}, z_{P_{VP}}(k) + t_{P_{VP}} + m_{P_{VP}, P_{VN}}, z_{P_{PG}}(k) + t_{P_{PG}} + m_{P_{PG}, P_{VN}}) \quad (268)$$

$$z_{P_{VO}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VO}}, z_{P_{PG}}(k) + t_{P_{PG}} + m_{P_{PG}, P_{VO}}) \quad (269)$$

Ve druhé etapě bylo prostřednictvím rovnic (270) - (277) zajištěno, aby začátky zelených pro koordinované proudy umožnily plynulý průjezd koordinovaným úsekem a začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve druhé fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené v první fázi a dodržení příslušných mezičasuů.

$$z_{P_{VA}}(k+1) = \max(z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{VA}}, z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{VA}}, \quad (270)$$

$$z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VI}} + t_v, z_{P_{VO}}(k) + t_{P_{VO}} + m_{P_{VO}, P_{VI}} + t_v)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VE}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{VE}}) \quad (271)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{PB}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (272)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = \max(z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{PD}}, z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{PD}}) \quad (273)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = \max(z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VI}}, z_{P_{VO}}(k) + t_{P_{VO}} + m_{P_{VO}, P_{VI}}) \quad (274)$$

$$z_{P_{VM}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VM}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{VM}}, \quad (275)$$

$$z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VE}} + t_v, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{VE}} + t_v)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{PF}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (276)$$

$$z_{P_{PH}}(k+1) = \max(z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{PH}}, z_{P_{VO}}(k) + t_{P_{VO}} + m_{P_{VO}, P_{PH}}) \quad (277)$$

Ve třetí etapě bylo prostřednictvím rovnic (278) - (285) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve třetí fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve druhé fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VD}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{VD}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{VD}}, z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB}, P_{VD}}) \quad (278)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{VH}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{VH}}, z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (279)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{PA}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{PA}}) \quad (280)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{PC}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (281)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = \max(z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{VL}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{VL}}, z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VL}}) \quad (282)$$

$$z_{P_{VP}}(k+1) = \max(z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{VP}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{VP}}, z_{P_{PH}}(k) + t_{P_{PH}} + m_{P_{PH}, P_{VP}}) \quad (283)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = \max(z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{PE}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{PE}}) \quad (284)$$

$$z_{P_{PG}}(k+1) = \max(z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{PG}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{PG}}) \quad (285)$$

Úpravou systému rovnic (262) - (285) byly sestaveny rovnice (286) - (309), které modelují začátky zelených pro koordinované a nekoordinované proudy při první variantě koordinace průsečných křižovatek.

Max-plus model pro první variantu koordinace průsečných křižovatek:

$$z_{P_{VB}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VB}}) \quad (286)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VC}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VC}}) \quad (287)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VF}}) \quad (288)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VG}}) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VG}}) \quad (289)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{VP}}(k) \otimes t_{P_{VP}} \otimes m_{P_{VP}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VJ}}) \quad (290)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = (z_{P_{VP}}(k) \otimes t_{P_{VP}} \otimes m_{P_{VP}, P_{VK}}) \oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VK}}) \quad (291)$$

$$z_{P_{VN}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VN}}) \oplus (z_{P_{VP}}(k) \otimes t_{P_{VP}} \otimes m_{P_{VP}, P_{VN}}) \oplus (z_{P_{PG}}(k) \otimes t_{P_{PG}} \otimes m_{P_{PG}, P_{VH}}) \quad (292)$$

$$z_{P_{VO}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VO}}) \oplus (z_{P_{PG}}(k) \otimes t_{P_{PG}} \otimes m_{P_{PG}, P_{VO}}) \quad (293)$$

$$z_{P_{VA}}(k+1) = (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{VA}}) \oplus (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{VA}}) \oplus (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VI}} \otimes t_v, z_{P_{VO}}(k) \otimes t_{P_{VO}} \otimes m_{P_{VO}, P_{VI}} \otimes t_v) \quad (294)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VE}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{VE}}) \quad (295)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{PB}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (296)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{PD}}) \oplus (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{PD}}) \quad (297)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VI}}) \oplus (z_{P_{VO}}(k) \otimes t_{P_{VO}} \otimes m_{P_{VO}, P_{VI}}) \quad (298)$$

$$z_{P_{VM}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VM}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{VM}}) \oplus (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VE}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{VE}} \otimes t_v) \quad (299)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{PF}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (300)$$

$$z_{P_{PH}}(k+1) = (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{PH}}) \oplus (z_{P_{VO}}(k) \otimes t_{P_{VO}} \otimes m_{P_{VO}, P_{PH}}) \quad (301)$$

$$z_{P_{VD}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VD}}) \quad (302)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (303)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{PA}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{PA}}) \quad (304)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{PC}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (305)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VM}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VL}}) \quad (306)$$

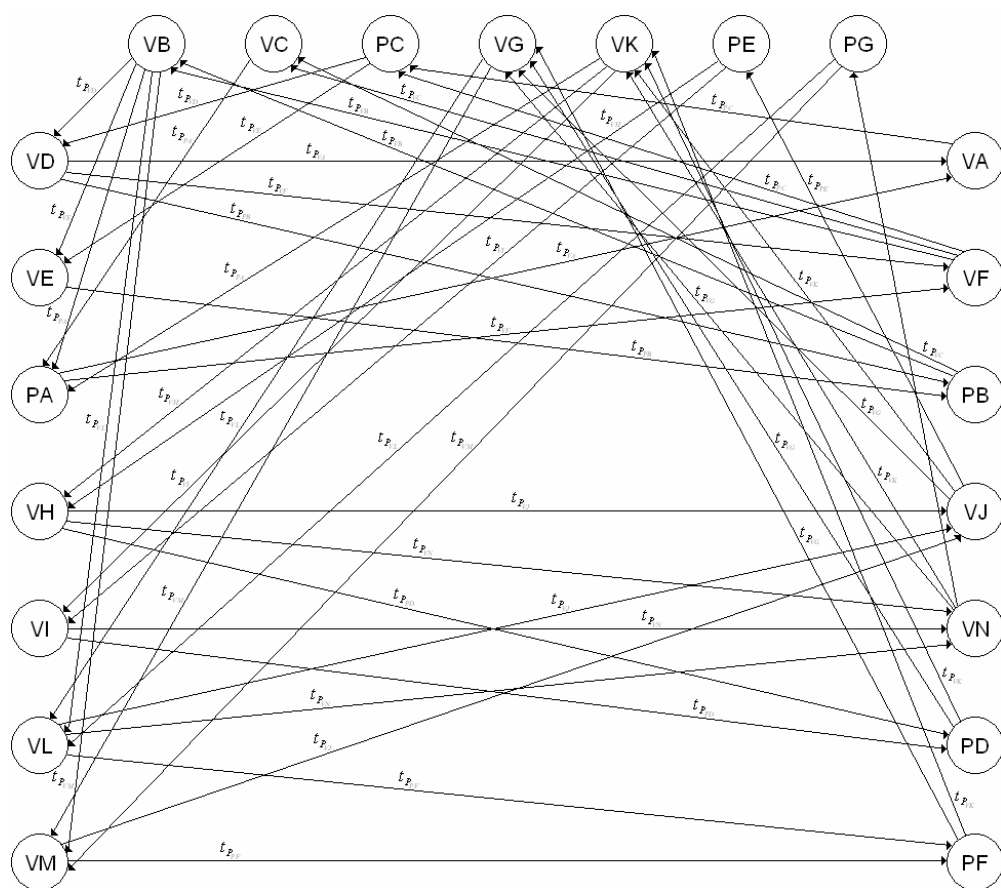
$$z_{P_{VP}}(k+1) = (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{VP}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{VP}}) \oplus (z_{P_{PH}}(k) \otimes t_{P_{PH}} \otimes m_{P_{PH}, P_{VP}}) \quad (307)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{PE}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{PE}}) \quad (308)$$

$$z_{P_{PG}}(k+1) = (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{PG}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{PG}}) \quad (309)$$

Matice systému (310) max-plus modelu pro první variantu koordinace průsečných křižovatek, na základě kterého byl vytvořen komunikační graf (obr. č. 46).

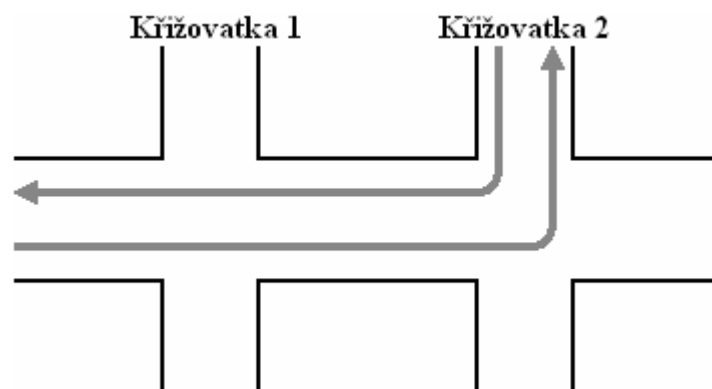
$$\begin{array}{lll}
 A(P_{VB}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{VA}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} & A(P_{VD}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} \\
 A(P_{VB}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{VA}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} & A(P_{VD}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} \\
 A(P_{VB}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{VA}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{VD}, P_{PB}) = t_{P_{PB}} \\
 A(P_{VC}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{VA}, P_{VO}) = t_{P_{VO}} & A(P_{VH}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} \\
 A(P_{VC}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{VE}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} & A(P_{VH}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} \\
 A(P_{VF}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{VE}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} & A(P_{VH}, P_{PD}) = t_{P_{PD}} \\
 A(P_{VF}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{PB}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} & A(P_{PA}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} \\
 A(P_{VF}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} & A(P_{PB}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} & A(P_{PA}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} \\
 A(P_{VG}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{PD}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} & A(P_{PC}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} \\
 A(P_{VG}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} & A(P_{PD}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} & A(P_{PC}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} \\
 A(P_{VJ}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} & A(P_{VI}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{VL}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} \\
 A(P_{VJ}, P_{VP}) = t_{P_{VP}} & A(P_{VI}, P_{VO}) = t_{P_{VO}} & A(P_{VL}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} \\
 A(P_{VJ}, P_{PE}) = t_{P_{PE}} & A(P_{VM}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} & A(P_{VL}, P_{PF}) = t_{P_{PF}} \\
 A(P_{VK}, P_{VP}) = t_{P_{VP}} & A(P_{VM}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} & A(P_{VP}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} \\
 A(P_{VK}, P_{PE}) = t_{P_{PE}} & A(P_{VM}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} & A(P_{VP}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} \\
 A(P_{VN}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} & A(P_{VM}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} & A(P_{VP}, P_{PH}) = t_{P_{PH}} \\
 A(P_{VN}, P_{VP}) = t_{P_{VP}} & A(P_{PF}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} & A(P_{PE}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} \\
 A(P_{VN}, P_{PG}) = t_{P_{PG}} & A(P_{PF}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} & A(P_{PE}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} \\
 A(P_{VO}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} & A(P_{PH}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} & A(P_{PG}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} \\
 A(P_{VO}, P_{PG}) = t_{P_{PG}} & A(P_{PH}, P_{VO}) = t_{P_{VO}} & A(P_{PG}, P_{VM}) = t_{P_{VM}}
 \end{array} \tag{310}$$



Obr. č. 46: Komunikační graf pro první variantu koordinace průsečných křižovatek

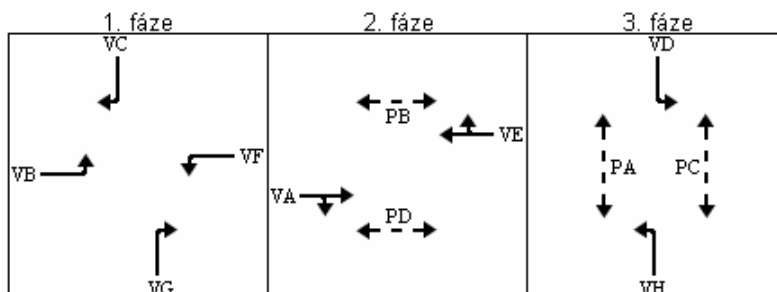
6.4.2 Druhá varianta koordinace

V rámci druhé varianty byly koordinovány proudy vyjíždějící do soustavy průsečných křižovatek v přímém, resp. odbočném směru a vyjíždějící ze soustavy průsečných křižovatek v odbočném, resp. přímém směru (viz. obr. č. 47).

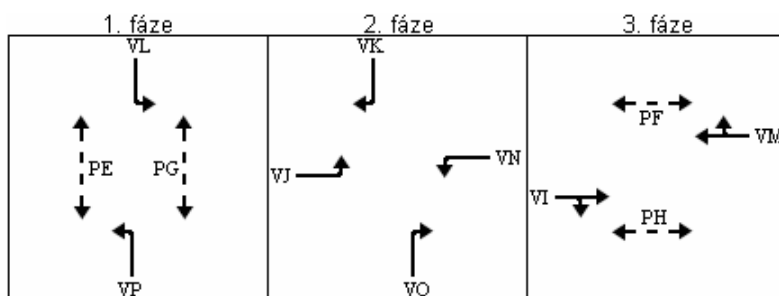


Obr. č. 47: Druhá varianta koordinace průsečných křižovatek

Max-plus model pro druhou variantu koordinace průsečných křižovatek byl vytvořen s ohledem na navržená fázová schémata (obr. č. 48 a 49), která jsou předpokladem bezpečného vstupu všech dopravních proudů a koordinovaného vstupu vozidlových proudů VA, VJ a VK, VE.



Obr. č. 48: Fázové schéma pro křižovatku 1



Obr. č. 49: Fázové schéma pro křižovatku 2

V první etapě bylo prostřednictvím rovnic (311) - (318) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující v první fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve třetí fázi a dodržení příslušných mezičasu.

$$z_{P_{VB}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VB}}, z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VB}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VB}}) \quad (311)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VC}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VC}}) \quad (312)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VF}}, z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VF}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VF}}) \quad (313)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VG}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VG}}) \quad (314)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = \max(z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{VL}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{VL}}, z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VL}}) \quad (315)$$

$$z_{P_{VP}}(k+1) = \max(z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{VP}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{VP}}, z_{P_{PH}}(k) + t_{P_{PH}} + m_{P_{PH}, P_{VP}}) \quad (316)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = \max(z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{PE}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{PE}}) \quad (317)$$

$$z_{P_{PG}}(k+1) = \max(z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{PG}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{PG}}) \quad (318)$$

Ve druhé etapě bylo prostřednictvím rovnic (319) - (326) zajištěno, aby začátky zelených pro koordinované proudy umožnily plynulý průjezd koordinovaným úsekem a začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve druhé fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené v první fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VA}}(k+1) = \max(z_{P_{VF}}(l) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{VA}}, z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{VA}}, \quad (319)$$

$$z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VJ}} + t_v, z_{P_{VP}}(k) + t_{P_{VP}} + m_{P_{VP}, P_{VJ}} + t_v, \\ z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VJ}} + t_v)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VE}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{VE}}) \quad (320)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{PB}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (321)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = \max(z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{PD}}, z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{PD}}) \quad (322)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VJ}}, z_{P_{VP}}(k) + t_{P_{VP}} + m_{P_{VP}, P_{VJ}}, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VJ}}) \quad (323)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = \max(z_{P_{VP}}(k) + t_{P_{VP}} + m_{P_{VP}, P_{VK}}, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VK}}, \quad (324)$$

$$z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VE}} + t_v, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{VE}} + t_v)$$

$$z_{P_{VN}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VN}}, z_{P_{VP}}(k) + t_{P_{VP}} + m_{P_{VP}, P_{VN}}, z_{P_{PG}}(k) + t_{P_{PG}} + m_{P_{PG}, P_{VN}}) \quad (325)$$

$$z_{P_{VO}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VO}}, z_{P_{PG}}(k) + t_{P_{PG}} + m_{P_{PG}, P_{VO}}) \quad (326)$$

Ve třetí etapě bylo prostřednictvím rovnic (327) - (334) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve třetí fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve druhé fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VD}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{VD}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{VD}}, z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB}, P_{VD}}) \quad (327)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{VH}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{VH}}, z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (328)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{PA}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{PA}}) \quad (329)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{PC}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (330)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = \max(z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VI}}, z_{P_{VO}}(k) + t_{P_{VO}} + m_{P_{VO}, P_{VI}}) \quad (331)$$

$$z_{P_{VM}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VM}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{VM}}) \quad (332)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{PF}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (333)$$

$$z_{P_{PH}}(k+1) = \max(z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{PH}}, z_{P_{VO}}(k) + t_{P_{VO}} + m_{P_{VO}, P_{PH}}) \quad (334)$$

Úpravou systému rovnic (311) - (334) byly sestaveny rovnice (335) - (358), které modelují začátky zelených pro koordinované a nekoordinované proudy ve druhé variantě koordinace průsečných křižovatek.

Max-plus model pro druhou variantu koordinace průsečných křižovatek:

$$z_{P_{VB}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VB}}) \quad (335)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VC}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VC}}) \quad (336)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VF}}) \quad (337)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VG}}) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VG}}) \quad (338)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VL}}) \quad (339)$$

$$z_{P_{VP}}(k+1) = (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{VP}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{VP}}) \oplus (z_{P_{PH}}(k) \otimes t_{P_{PH}} \otimes m_{P_{PH}, P_{VP}}) \quad (340)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{PE}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{PE}}) \quad (341)$$

$$z_{P_{PG}}(k+1) = (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{PG}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{PG}}) \quad (342)$$

$$z_{P_{VA}}(k+1) = (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{VA}}) \oplus (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{VA}}) \oplus (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VJ}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{VP}}(k) \otimes t_{P_{VP}} \otimes m_{P_{VP}, P_{VJ}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VJ}} \otimes t_v) \quad (343)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VE}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{VE}}) \quad (344)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{PB}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (345)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{PD}}) \oplus (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{PD}}) \quad (346)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{VP}}(k) \otimes t_{P_{VP}} \otimes m_{P_{VP}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VJ}}) \quad (347)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = (z_{P_{VP}}(k) \otimes t_{P_{VP}} \otimes m_{P_{VP}, P_{VK}}) \oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VK}}) \oplus (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VE}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{VE}} \otimes t_v) \quad (348)$$

$$z_{P_{VN}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VN}}) \oplus (z_{P_{VP}}(k) \otimes t_{P_{VP}} \otimes m_{P_{VP}, P_{VN}}) \oplus (z_{P_{PG}}(k) \otimes t_{P_{PG}} \otimes m_{P_{PG}, P_{VN}}) \quad (349)$$

$$z_{P_{VO}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VO}}) \oplus (z_{P_{PG}}(k) \otimes t_{P_{PG}} \otimes m_{P_{PG}, P_{VO}}) \quad (350)$$

$$z_{P_{VD}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VD}}) \quad (351)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (352)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{PA}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{PA}}) \quad (353)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{PC}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (354)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VI}}) \oplus (z_{P_{VO}}(k) \otimes t_{P_{VO}} \otimes m_{P_{VO}, P_{VI}}) \quad (355)$$

$$z_{P_{VM}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VM}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{VM}}) \quad (356)$$

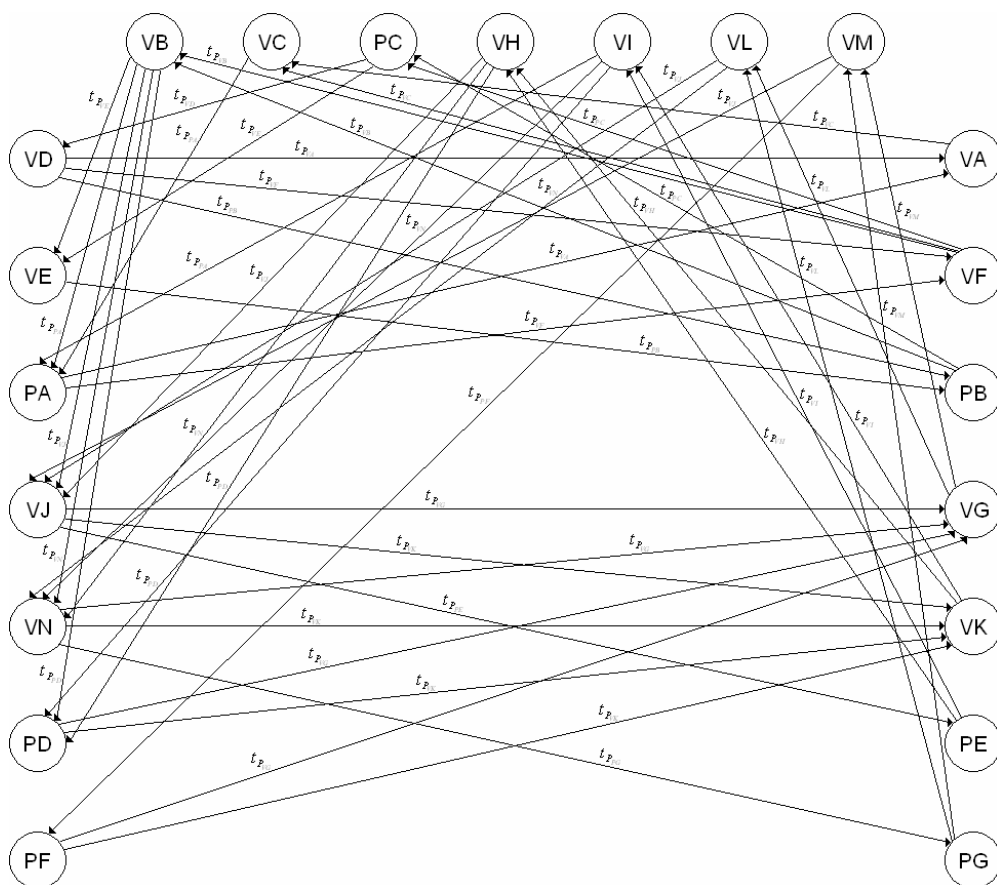
$$z_{P_{PF}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{PF}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (357)$$

$$z_{P_{PH}}(k+1) = (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{PH}}) \oplus (z_{P_{VO}}(k) \otimes t_{P_{VO}} \otimes m_{P_{VO}, P_{PH}}) \quad (358)$$

Matice systému (359) max-plus modelu pro druhou variantu koordinace průsečných křižovatek, na základě kterého byl vytvořen komunikační graf (obr. č. 50).

$$\begin{array}{lll} A(P_{VB}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{VA}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} & A(P_{VN}, P_{PG}) = t_{P_{PG}} \\ A(P_{VB}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{VA}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} & A(P_{VO}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} \\ A(P_{VB}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{VA}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} & A(P_{VO}, P_{PG}) = t_{P_{PG}} \\ A(P_{VC}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{VA}, P_{VP}) = t_{P_{VP}} & A(P_{VD}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} \\ A(P_{VC}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{VA}, P_{PE}) = t_{P_{PE}} & A(P_{VD}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} \\ A(P_{VF}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{VE}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} & A(P_{VD}, P_{PB}) = t_{P_{PB}} \\ A(P_{VF}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{VE}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} & A(P_{PA}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} \\ A(P_{VF}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} & A(P_{PB}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} & A(P_{PA}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} \\ A(P_{VG}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{PB}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} & A(P_{PC}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} \\ A(P_{VG}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} & A(P_{PD}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} & A(P_{PC}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} \\ A(P_{VL}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} & A(P_{PD}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} & A(P_{VI}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} \end{array} \quad (359)$$

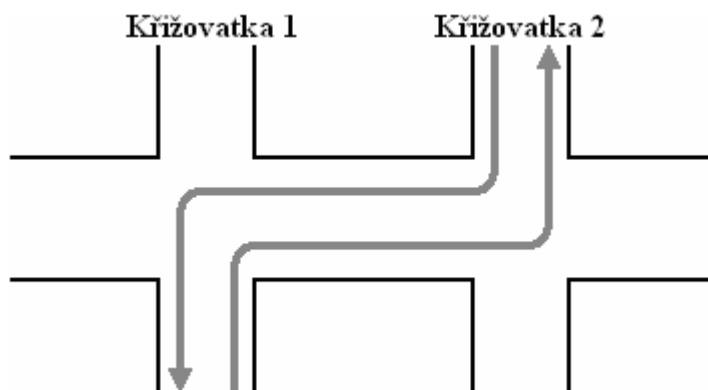
$$\begin{array}{lll}
A(P_{VL}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} & A(P_{VJ}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} & A(P_{VI}, P_{VO}) = t_{P_{VO}} \\
A(P_{VL}, P_{PF}) = t_{P_{PF}} & A(P_{VJ}, P_{VP}) = t_{P_{VP}} & A(P_{VM}, P_{VJ}) = t_{P_{PJ}} \\
A(P_{VP}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} & A(P_{VJ}, P_{PE}) = t_{P_{PE}} & A(P_{VM}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} \\
A(P_{VP}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} & A(P_{VK}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} & A(P_{PF}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} \\
A(P_{VP}, P_{PH}) = t_{P_{PH}} & A(P_{VK}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} & A(P_{PF}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} \\
A(P_{PE}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} & A(P_{VK}, P_{VP}) = t_{P_{VP}} & A(P_{PH}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} \\
A(P_{PE}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} & A(P_{VK}, P_{PE}) = t_{P_{PE}} & A(P_{PH}, P_{VO}) = t_{P_{VO}} \\
A(P_{PG}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} & A(P_{VN}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} & \\
A(P_{PG}, P_{VM}) = t_{P_{PM}} & A(P_{VN}, P_{VP}) = t_{P_{VP}} &
\end{array}$$



Obr. č. 50: Komunikační graf pro druhou variantu koordinace průsečných křižovatek

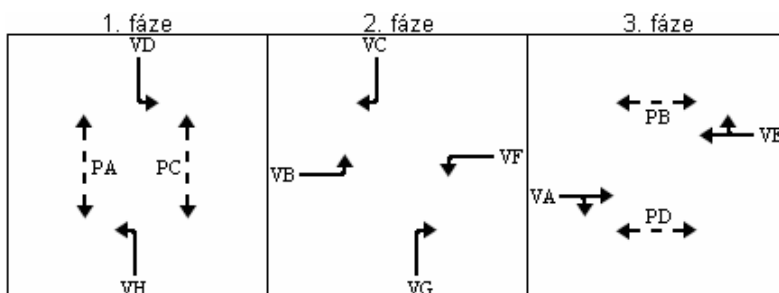
6.4.3 Třetí varianta koordinace

V rámci třetí varianty byly koordinovány proudy vjíždějící do soustavy průsečných křižovatek v odbočném směru a vyjíždějící ze soustavy průsečných křižovatek v odbočném směru (viz. obr. č. 51).

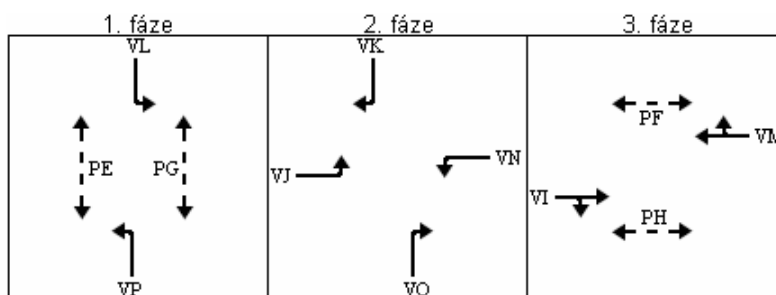


Obr. č. 51: Třetí varianta koordinace průsečných křižovatek

Max-plus model pro třetí variantu koordinace průsečných křižovatek byl vytvořen s ohledem na navržená fázová schémata (obr. č. 52 a 53), která jsou předpokladem bezpečného vstupu všech dopravních proudů a koordinovaného vstupu vozidlových proudů VG, VJ a VK, VF.



Obr. č. 52: Fázové schéma pro křižovatku 1



Obr. č. 53: Fázové schéma pro křižovatku 2

V první etapě bylo prostřednictvím rovnic (360) - (367) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující v první fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve třetí fázi a dodržení příslušných mezičasuů.

$$z_{P_{VD}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{VD}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{VD}}, z_{P_{PB}}(k) + t_{P_{PB}} + m_{P_{PB}, P_{VD}}) \quad (360)$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{VH}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{VH}}, z_{P_{PD}}(k) + t_{P_{PD}} + m_{P_{PD}, P_{VH}}) \quad (361)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{PA}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{PA}}) \quad (362)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{PC}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (363)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = \max(z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{VL}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{VL}}, z_{P_{PF}}(k) + t_{P_{PF}} + m_{P_{PF}, P_{VL}}) \quad (364)$$

$$z_{P_{VP}}(k+1) = \max(z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{VP}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{VP}}, z_{P_{PH}}(k) + t_{P_{PH}} + m_{P_{PH}, P_{VP}}) \quad (365)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = \max(z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{PE}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{PE}}) \quad (366)$$

$$z_{P_{PG}}(k+1) = \max(z_{P_{VI}}(k) + t_{P_{VI}} + m_{P_{VI}, P_{PG}}, z_{P_{VM}}(k) + t_{P_{VM}} + m_{P_{VM}, P_{PG}}) \quad (367)$$

Ve druhé etapě bylo prostřednictvím rovnic (368) - (375) zajištěno, aby začátky zelených pro koordinované proudy umožnily plynulý průjezd koordinovaným úsekem a začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve druhé fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené v první fázi a dodržení příslušných mezičasuů.

$$z_{P_{VB}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VB}}, z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VB}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VB}}) \quad (368)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VC}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VC}}) \quad (369)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VF}}, z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VF}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VF}}) \quad (370)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = \max(z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VG}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VG}}, \quad (371)$$

$$z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VJ}} + t_v, z_{P_{VP}}(k) + t_{P_{VP}} + m_{P_{VP}, P_{VJ}} + t_v,$$

$$z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VJ}} + t_v)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VJ}}, z_{P_{VP}}(k) + t_{P_{VP}} + m_{P_{VP}, P_{VJ}}, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VJ}}) \quad (372)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = \max(z_{P_{VP}}(k) + t_{P_{VP}} + m_{P_{VP}, P_{VK}}, z_{P_{PE}}(k) + t_{P_{PE}} + m_{P_{PE}, P_{VK}}, \quad (373)$$

$$z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VF}} + t_v, z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VF}} + t_v,$$

$$z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VF}} + t_v)$$

$$z_{P_{VN}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VN}}, z_{P_{VP}}(k) + t_{P_{VP}} + m_{P_{VP}, P_{VN}}, z_{P_{PG}}(k) + t_{P_{PG}} + m_{P_{PG}, P_{VN}}) \quad (374)$$

$$z_{P_{VO}}(k+1) = \max(z_{P_{VL}}(k) + t_{P_{VL}} + m_{P_{VL}, P_{VO}}, z_{P_{PG}}(k) + t_{P_{PG}} + m_{P_{PG}, P_{VO}}) \quad (375)$$

Ve třetí etapě bylo prostřednictvím rovnic (376) - (383) zajištěno, aby začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve třetí fázi byly umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve druhé fázi a dodržení příslušných mezičasů.

$$z_{P_{VA}}(k+1) = \max(z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{VA}}, z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{VA}}) \quad (376)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{VE}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{VE}}) \quad (377)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{PB}}, z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (378)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = \max(z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{PD}}, z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{PD}}) \quad (379)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = \max(z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{VI}}, z_{P_{VO}}(k) + t_{P_{VO}} + m_{P_{VO}, P_{VI}}) \quad (380)$$

$$z_{P_{VM}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VM}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{VM}}) \quad (381)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = \max(z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{PF}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (382)$$

$$z_{P_{PH}}(k+1) = \max(z_{P_{VN}}(k) + t_{P_{VN}} + m_{P_{VN}, P_{PH}}, z_{P_{VO}}(k) + t_{P_{VO}} + m_{P_{VO}, P_{PH}}) \quad (383)$$

Úpravou systému rovnic (360) - (383) byly sestaveny rovnice (384) - (407), které modelují začátky zelených pro koordinované a nekoordinované proudy ve třetí variantě koordinace průsečných křižovatek.

Max-plus model pro třetí variantu koordinace průsečných křižovatek:

$$z_{P_{VD}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{VD}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{VD}}) \oplus \quad (384)$$

$$\oplus (z_{P_{PB}}(k) \otimes t_{P_{PB}} \otimes m_{P_{PB}, P_{VD}})$$

$$z_{P_{VH}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{VH}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{VH}}) \oplus \quad (385)$$

$$\oplus (z_{P_{PD}}(k) \otimes t_{P_{PD}} \otimes m_{P_{PD}, P_{VH}})$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{PA}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{PA}}) \quad (386)$$

$$z_{P_{PC}}(k+1) = (z_{P_{VA}}(k) \otimes t_{P_{VA}} \otimes m_{P_{VA}, P_{PC}}) \oplus (z_{P_{VE}}(k) \otimes t_{P_{VE}} \otimes m_{P_{VE}, P_{PC}}) \quad (387)$$

$$z_{P_{VL}}(k+1) = (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{VL}}) \oplus (z_{P_{PF}}(k) \otimes t_{P_{PF}} \otimes m_{P_{PF}, P_{VL}}) \quad (388)$$

$$z_{P_{VP}}(k+1) = (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{VP}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{VP}}) \oplus (z_{P_{PH}}(k) \otimes t_{P_{PH}} \otimes m_{P_{PH}, P_{VP}}) \quad (389)$$

$$z_{P_{PE}}(k+1) = (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{PE}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{PE}}) \quad (390)$$

$$z_{P_{PG}}(k+1) = (z_{P_{VI}}(k) \otimes t_{P_{VI}} \otimes m_{P_{VI}, P_{PG}}) \oplus (z_{P_{VM}}(k) \otimes t_{P_{VM}} \otimes m_{P_{VM}, P_{PG}}) \quad (391)$$

$$z_{P_{VB}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VB}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VB}}) \quad (392)$$

$$z_{P_{VC}}(k+1) = (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VC}}) \oplus (z_{P_{PA}}(k) \otimes t_{P_{PA}} \otimes m_{P_{PA}, P_{VC}}) \quad (393)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VF}}) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VF}}) \quad (394)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VG}}) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VG}}) \oplus (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VJ}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{VP}}(k) \otimes t_{P_{VP}} \otimes m_{P_{VP}, P_{VJ}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VJ}} \otimes t_v) \quad (395)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{VP}}(k) \otimes t_{P_{VP}} \otimes m_{P_{VP}, P_{VJ}}) \oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VJ}}) \quad (396)$$

$$z_{P_{VK}}(k+1) = (z_{P_{VP}}(k) \otimes t_{P_{VP}} \otimes m_{P_{VP}, P_{VK}}) \oplus (z_{P_{PE}}(k) \otimes t_{P_{PE}} \otimes m_{P_{PE}, P_{VK}}) \oplus (z_{P_{VD}}(k) \otimes t_{P_{VD}} \otimes m_{P_{VD}, P_{VF}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{VH}}(k) \otimes t_{P_{VH}} \otimes m_{P_{VH}, P_{VF}} \otimes t_v) \oplus (z_{P_{PC}}(k) \otimes t_{P_{PC}} \otimes m_{P_{PC}, P_{VF}} \otimes t_v) \quad (397)$$

$$z_{P_{VN}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VN}}) \oplus (z_{P_{VP}}(k) \otimes t_{P_{VP}} \otimes m_{P_{VP}, P_{VN}}) \oplus (z_{P_{PG}}(k) \otimes t_{P_{PG}} \otimes m_{P_{PG}, P_{VN}}) \quad (398)$$

$$z_{P_{VO}}(k+1) = (z_{P_{VL}}(k) \otimes t_{P_{VL}} \otimes m_{P_{VL}, P_{VO}}) \oplus (z_{P_{PG}}(k) \otimes t_{P_{PG}} \otimes m_{P_{PG}, P_{VO}}) \quad (399)$$

$$z_{P_{VA}}(k+1) = (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{VA}}) \oplus (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{VA}}) \quad (400)$$

$$z_{P_{VE}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{VE}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{VE}}) \quad (401)$$

$$z_{P_{PB}}(k+1) = (z_{P_{VB}}(k) \otimes t_{P_{VB}} \otimes m_{P_{VB}, P_{PB}}) \oplus (z_{P_{VC}}(k) \otimes t_{P_{VC}} \otimes m_{P_{VC}, P_{PB}}) \quad (402)$$

$$z_{P_{PD}}(k+1) = (z_{P_{VF}}(k) \otimes t_{P_{VF}} \otimes m_{P_{VF}, P_{PD}}) \oplus (z_{P_{VG}}(k) \otimes t_{P_{VG}} \otimes m_{P_{VG}, P_{PD}}) \quad (403)$$

$$z_{P_{VI}}(k+1) = (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{VI}}) \oplus (z_{P_{VO}}(k) \otimes t_{P_{VO}} \otimes m_{P_{VO}, P_{VI}}) \quad (404)$$

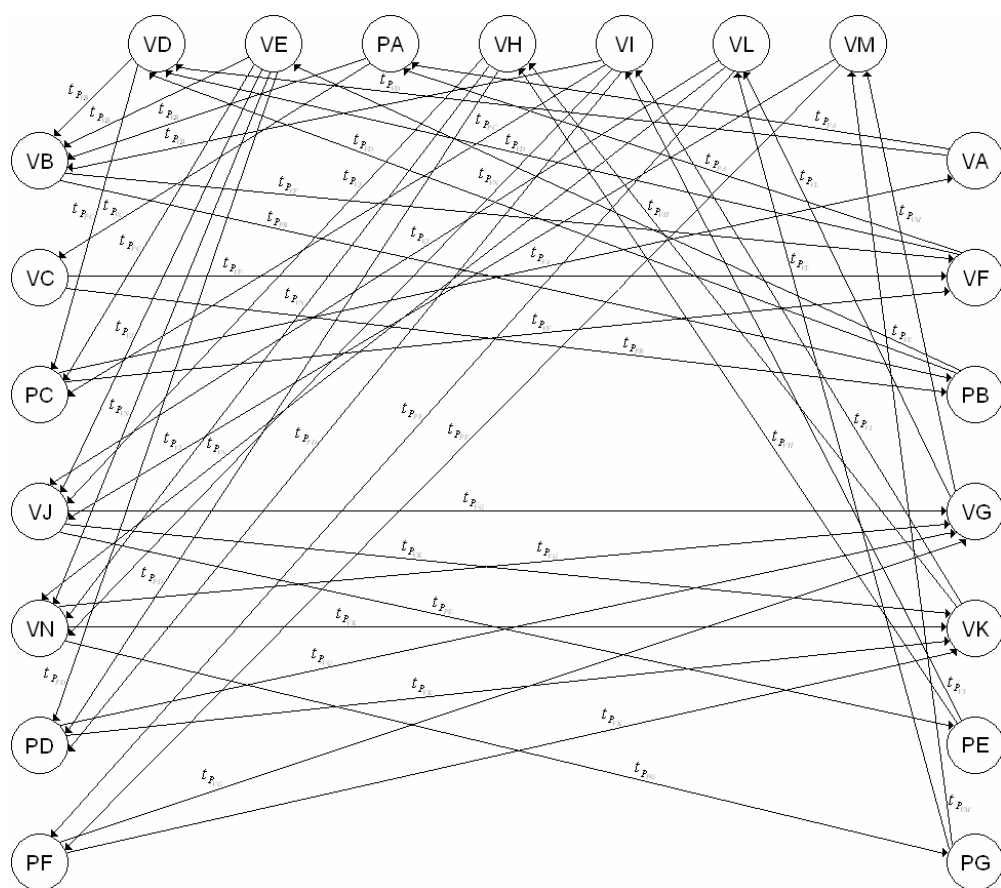
$$z_{P_{VM}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{VM}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{VM}}) \quad (405)$$

$$z_{P_{PF}}(k+1) = (z_{P_{VJ}}(k) \otimes t_{P_{VJ}} \otimes m_{P_{VJ}, P_{PF}}) \oplus (z_{P_{VK}}(k) \otimes t_{P_{VK}} \otimes m_{P_{VK}, P_{PF}}) \quad (406)$$

$$z_{P_{PH}}(k+1) = (z_{P_{VN}}(k) \otimes t_{P_{VN}} \otimes m_{P_{VN}, P_{PH}}) \oplus (z_{P_{VO}}(k) \otimes t_{P_{VO}} \otimes m_{P_{VO}, P_{PH}}) \quad (407)$$

Matice systému (408) max-plus modelu pro třetí variantu koordinace průsečných křižovatek, na základě kterého byl vytvořen komunikační graf (obr. č. 54).

$$\begin{array}{lll}
A(P_{VD}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} & A(P_{VB}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{VN}, P_{VP}) = t_{P_{VP}} \\
A(P_{VD}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} & A(P_{VB}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{VN}, P_{PG}) = t_{P_{PG}} \\
A(P_{VD}, P_{PB}) = t_{P_{PB}} & A(P_{VC}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{VO}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} \\
A(P_{VH}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} & A(P_{VC}, P_{PA}) = t_{P_{PA}} & A(P_{VO}, P_{PG}) = t_{P_{PG}} \\
A(P_{VH}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} & A(P_{VF}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{VA}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} \\
A(P_{VH}, P_{PD}) = t_{P_{PD}} & A(P_{VF}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{VA}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} \\
A(P_{PA}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} & A(P_{VF}, P_{PC}) = t_{P_{VB}} & A(P_{VE}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} \\
A(P_{PA}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} & A(P_{VG}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{VE}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} \\
A(P_{PC}, P_{VA}) = t_{P_{VA}} & A(P_{VG}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} & A(P_{PB}, P_{VB}) = t_{P_{VB}} \\
A(P_{PC}, P_{VE}) = t_{P_{VE}} & A(P_{VG}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} & A(P_{PB}, P_{VC}) = t_{P_{VC}} \\
A(P_{VL}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} & A(P_{VG}, P_{VP}) = t_{P_{VP}} & A(P_{PD}, P_{VF}) = t_{P_{VF}} \\
A(P_{VL}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} & A(P_{VG}, P_{PE}) = t_{P_{VP}} & A(P_{PD}, P_{VG}) = t_{P_{VG}} \\
A(P_{VL}, P_{PF}) = t_{P_{PF}} & A(P_{VJ}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} & A(P_{VI}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} \\
A(P_{VP}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} & A(P_{VJ}, P_{VP}) = t_{P_{VP}} & A(P_{VI}, P_{VO}) = t_{P_{VO}} \\
A(P_{VP}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} & A(P_{VJ}, P_{PE}) = t_{P_{PE}} & A(P_{VM}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} \\
A(P_{VP}, P_{PH}) = t_{P_{PH}} & A(P_{VK}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{VM}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} \\
A(P_{PE}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} & A(P_{VK}, P_{VH}) = t_{P_{VH}} & A(P_{PF}, P_{VJ}) = t_{P_{VJ}} \\
A(P_{PE}, P_{VM}) = t_{P_{VM}} & A(P_{VK}, P_{PC}) = t_{P_{PC}} & A(P_{PF}, P_{VK}) = t_{P_{VK}} \\
A(P_{PG}, P_{VI}) = t_{P_{VI}} & A(P_{VK}, P_{VP}) = t_{P_{VP}} & A(P_{VH}, P_{VN}) = t_{P_{VN}} \\
A(P_{PG}, P_{VM}) = t_{P_{PM}} & A(P_{VK}, P_{PE}) = t_{P_{PE}} & A(P_{VH}, P_{VO}) = t_{P_{VO}} \\
A(P_{VB}, P_{VD}) = t_{P_{VD}} & A(P_{VN}, P_{VL}) = t_{P_{VL}} &
\end{array} \quad (408)$$



Obr. č. 54: Komunikační graf pro třetí variantu koordinace průsečných křížovatek

7. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ NA REÁLNÝCH DATECH

Max-plus modely byly experimentálně využity při koordinaci silně závislých křižovatek, které se nacházejí severovýchodní části městského okruhu v Prostějově.

Ke stanovení počátečních začátků zelených na koordinovaných křižovatkách byla využita hodnota vlastního vektoru λ matice A vypočtená ze vztahu (409).

$$A \otimes z = \lambda \otimes z \quad (409)$$

Následné začátky zelených na koordinovaných křižovatkách byly stanoveny na základě vztahu (410).

$$z(k+1) = A \otimes z(k) \quad (410)$$

7.1 Parametry a proměnné

Pro rychlejší orientaci čtenáře budou před modelováním koordinace silně závislých křižovatek na městském okruhu v Prostějově zopakovány veličiny z kapitoly 6.1.

Proměnné veličiny:

$z_{p_i}(k)$ začátek zelené pro i -tý dopravní proud v k -té fázi, $p_i \in P$.

Konstantní veličiny:

P množina dopravních proudů,

$t_{p_i}(k)$ doba zelené pro i -tý dopravní proud v k -té fázi, $p_i \in P$,

$m_{p_i p_j}$ mezičas mezi koncem vstupu i -tého proudu do křižovatky a začátkem vstupu j -tého proudu do křižovatky, $p_i \in P$, $p_j \in P$,

t_v vyklizovací doba koordinovaného úseku.

7.2 Koordinace křižovatek Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova a Svatoplukova-Újezd

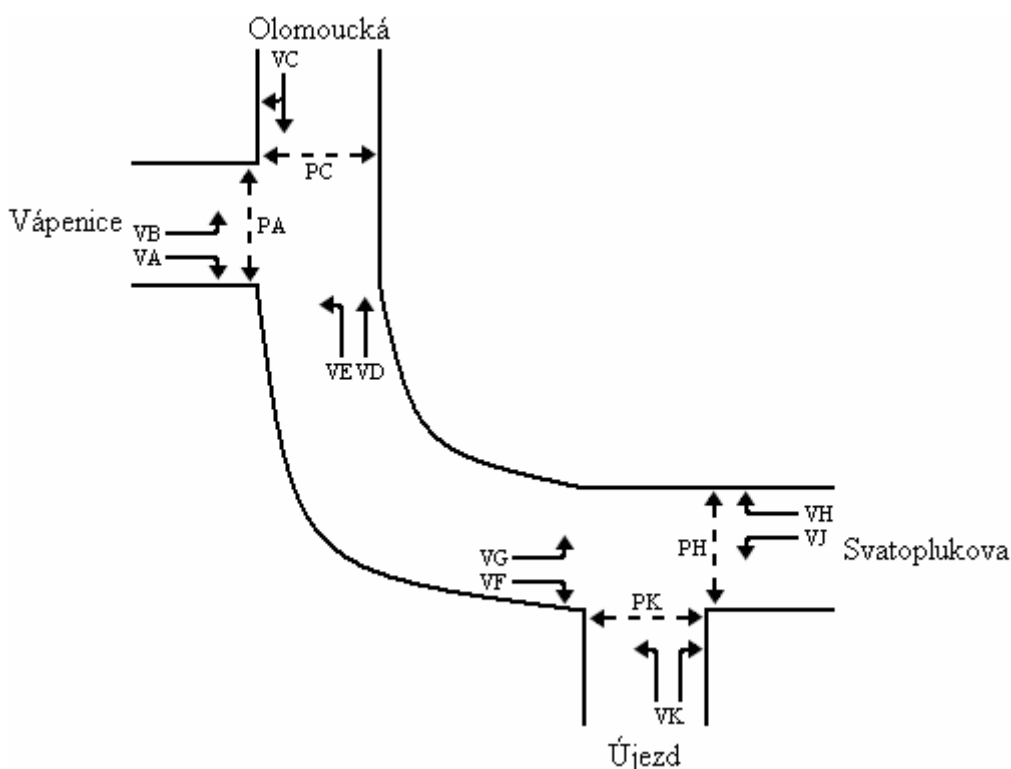
Při koordinaci křižovatek Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova a Svatoplukova-Újezd v Prostějově (obr. č. 55) byl využit max-plus model pro třetí variantu koordinace stykových křižovatek. Hlavní pozemní komunikaci představují ulice Vápenice a Újezd, které tvoří severovýchodní část městského okruhu. Vedlejší pozemní komunikace představují Olomoucká a Svatoplukova ulice, které jsou radiálami k městskému okruhu.



Obr. č. 55: Letecký pohled na koordinované křižovatky v severovýchodní části městského okruhu.

7.2.1 Analýza vstupních podkladů

Do koordinovaných křižovatek vstupuje 12 vozidlových a 4 chodecké proudy z množiny $P = \{VA, VB, \dots, PF\}$ (viz. obr. č. 56). Doby zelené pro dopravní proudy na koordinovaných křižovatkách jsou uvedeny v tab. č. 3 a 4.



Obr. č. 56: Schéma soustavy křižovatek

Tab. č. 3: Doby zelené na křižovatce Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova

Dopravní proud	VA	VB	VC	SC	VD	VE	PA	PC
Doba zelené [s]	53	21	21	23	38	31	5	5

Tab. č. 4: Doby zelené na křižovatce Svatooplukova-Újezd

Dopravní proud	VF	VG	VH	VJ	VK	SK	PH	PK
Doba zelené [s]	31	21	43	15	27	16	5	5

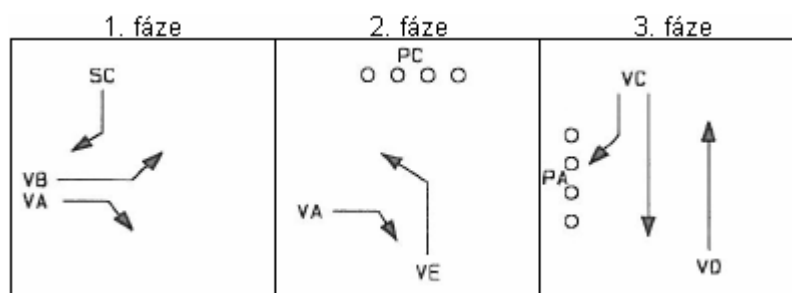
Mezičasy pro dvojice kolizních proudů jsou uvedeny v tab. č. 5 a 6, fázová schémata, která byla stanovena s ohledem na princip koordinace, jsou uvedena na obr. č. 57 a 58. Vyklizovací doba koordinovaného úseku činí 9 sekund.

Tab. č. 5: Matice mezičasů pro křižovatku Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova

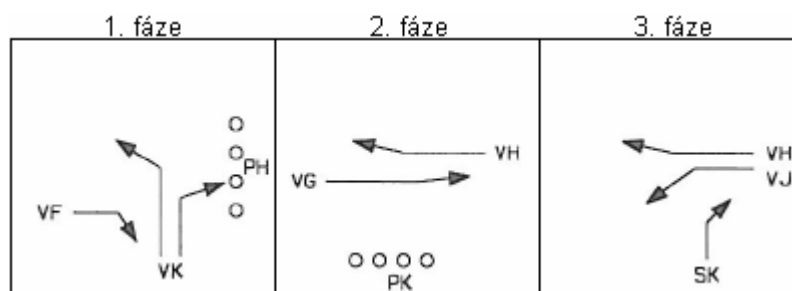
Vyklizuje	Najíždí							
	VA	VB	VC	SC	VD	VE	PA	PC
VA	-	-	3	-	-	-	4	-
VB	-	-	6	-	5	3	3	8
VC	4	2	-	-	-	4	-	4
SC	-	-	-	-	-	3	7	4
VD	-	3	-	-	-	-	-	6
VE	-	5	3	3	-	-	7	-
PA	13	11	-	8	-	8	-	-
PC	-	4	9	9	6	-	-	-

Tab. č. 6: Matice mezičasů pro křižovatku Svatooplukova-Újezd

Vyklizuje	Najíždí							
	VF	VG	VH	VJ	VK	SK	PH	PK
VF	-	-	-	3	-	-	-	6
VG	-	-	-	5	4	3	6	-
VH	-	-	-	-	3	-	4	-
VJ	5	4			6		3	7
VK	-	5	3	3	-	-	-	4
SK	-	4	-	-	-	-	7	4
PH	-	6	9	8		6		
PK	6			5	9	9		



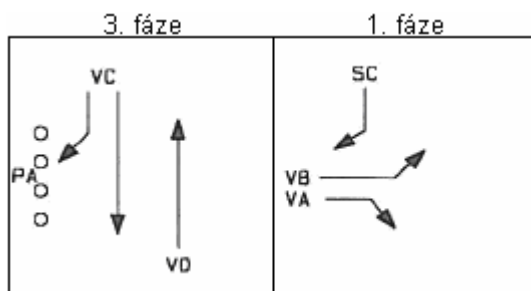
Obr. č. 57: Fázové schéma pro křižovatku Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova



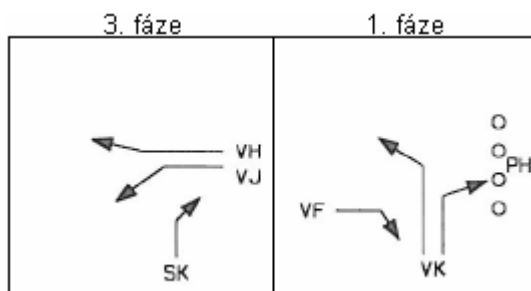
Obr. č. 58: Fázové schéma pro křižovatku Svatooplukova-Újezd

7.2.2 Modelování koordinace křižovatek

Na základě vstupních podkladů byly sestaveny rovnice (411) - (425). Rovnice (411) - (415) zajišťují, že začátky zelených pro dopravní proudy vstupující v první fázi budou umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve třetí fázi a dodržení příslušných mezičasů (viz. obr. č. 59 a 60).



Obr. č. 59: Fragment fázového schématu pro křižovatku Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova obsahující ukončení 3. fáze a začátek 1. fáze



Obr. č. 60: Fragment fázového schéma pro křižovatku Svatoplukova-Újezd obsahující ukončení 3. fáze a začátek 1. fáze

$$z_{P_{VA}}(k+1) = \max(z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{VA}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VA}}) \quad (411)$$

$$z_{P_{VB}}(k+1) = \max(z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{VB}}, z_{P_{VD}}(k) + t_{P_{VD}} + m_{P_{VD}, P_{VB}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{VB}}) \quad (412)$$

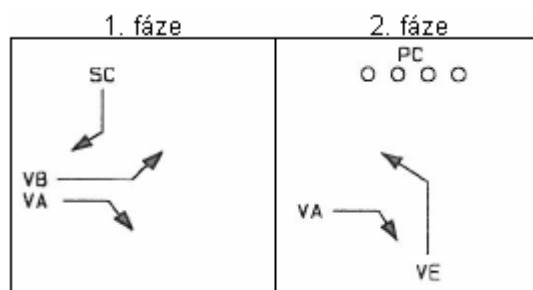
$$z_{P_{SC}}(k+1) = \max(z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{SC}}, z_{P_{PA}}(k) + t_{P_{PA}} + m_{P_{PA}, P_{SC}}) \quad (412)$$

$$z_{P_{VF}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_v, z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VF}}) \quad (413)$$

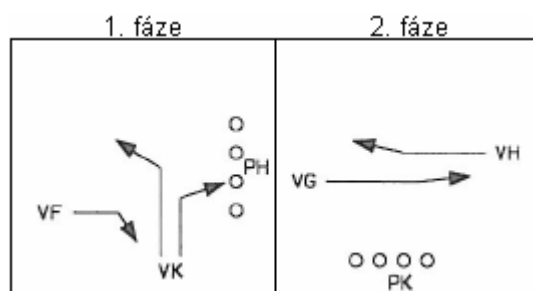
$$z_{P_{VK}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{VK}}, z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{VK}}, z_{P_{SK}}(k) + t_{P_{SK}} + m_{P_{SK}, P_{VK}}) \quad (414)$$

$$z_{P_{PH}}(k+1) = \max(z_{P_{VH}}(k) + t_{P_{VH}} + m_{P_{VH}, P_{PH}}, z_{P_{VJ}}(k) + t_{P_{VJ}} + m_{P_{VJ}, P_{PH}}, z_{P_{SK}}(k) + t_{P_{SK}} + m_{P_{SK}, P_{PH}}) \quad (415)$$

Rovnice (416) - (420) zajišťují, že začátky zelených pro koordinované proudy umožňují plynulý průjezd koordinovaným úsekem a začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve druhé fázi budou umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené v první fázi a dodržení příslušných mezer (viz. obr. č. 61 a 62).



Obr. č. 61: Fragment fázového schématu pro křižovatku Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova obsahující ukončení 1. fáze a začátek 2. fáze



Obr. č. 62: Fragment fázového schéma pro křižovatku Svatooplukova-Újezd obsahující ukončení 1. fáze a začátek 2. fáze

$$z_{P_{VE}}(k+1) = \max(z_{P_{VC}}(k) + t_{P_{VC}} + m_{P_{VC}, P_{VE}}, z_{P_{SC}}(k) + t_{P_{SC}} + m_{P_{PA}, P_{VE}}, z_{P_{VK}}(k) + t_v) \quad (416)$$

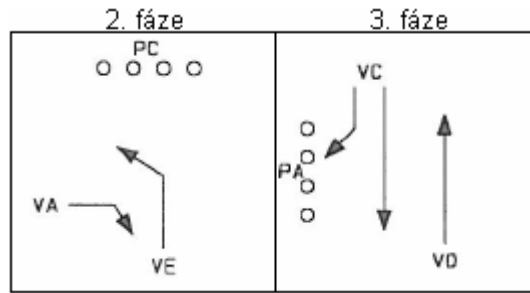
$$z_{P_{PC}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{PC}}, z_{P_{SC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{VD}, P_{PC}}) \quad (417)$$

$$z_{P_{VG}}(k+1) = \max(z_{P_{VB}}(k) + t_{P_{VB}} + m_{P_{VB}, P_{PC}}, z_{P_{PH}}(k) + t_{P_{PH}} + m_{P_{PH}, P_{VG}}) \quad (418)$$

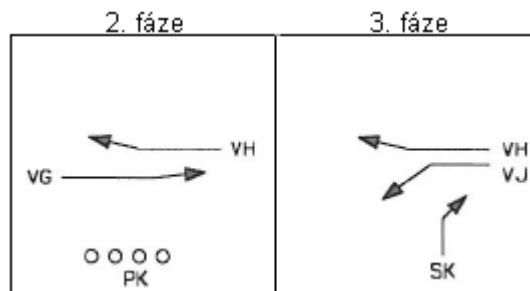
$$z_{P_{VH}}(k+1) = \max(z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{VH}}, z_{P_{PH}}(k) + t_{P_{PH}} + m_{P_{PH}, P_{VH}}) \quad (419)$$

$$z_{P_{PK}}(k+1) = \max(z_{P_{VF}}(k) + t_{P_{VF}} + m_{P_{VF}, P_{PK}}, z_{P_{VK}}(k) + t_{P_{VK}} + m_{P_{VK}, P_{PK}}) \quad (420)$$

Rovnice (421) - (425) zajišťují, že začátky zelených pro dopravní proudy vstupující ve třetí fázi budou umožněny po ukončení zelených pro dopravní proudy obsažené ve druhé fázi a dodržení příslušných mezer (viz. obr. č. 63 a 64).



Obr. č. 63: Fragment fázového schématu pro křižovatku Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova obsahující ukončení 2. fáze a začátek 3. fáze



Obr. č. 64: Fragment fázového schéma pro křižovatku Svatooplukova-Újezd obsahující ukončení 2. fáze a začátek 3. fáze

$$z_{P_{VC}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{VC}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{VC}}, z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{PC}, P_{VC}}) \quad (421)$$

$$z_{P_{VD}}(k+1) = \max(z_{P_{PC}}(k) + t_{P_{PC}} + m_{P_{VE}, P_{VD}}, \epsilon) \quad (422)$$

$$z_{P_{PA}}(k+1) = \max(z_{P_{VA}}(k) + t_{P_{VA}} + m_{P_{VA}, P_{PA}}, z_{P_{VE}}(k) + t_{P_{VE}} + m_{P_{VE}, P_{PA}}) \quad (423)$$

$$z_{P_{VJ}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{VJ}}, z_{P_{PK}}(k) + t_{P_{PK}} + m_{P_{PK}, P_{VJ}}) \quad (424)$$

$$z_{P_{SK}}(k+1) = \max(z_{P_{VG}}(k) + t_{P_{VG}} + m_{P_{VG}, P_{SK}}, z_{P_{PK}}(k) + t_{P_{PK}} + m_{P_{PK}, P_{SK}}) \quad (425)$$

V matematickém software Scilab byla pro matici A v (426) sestavenou na základě rovnic (411) - (425) vypočtena hodnota vlastního čísla a vlastního vektoru. Hodnota vlastního čísla umožňuje vymezení začátků zelených, které se po určité době opakují. Hodnota vlastního vektoru umožňuje definovat začátky zelených, po kterých nastane období, které se opakuje.

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} VA & VB & SC & VF & VK & PH & VE & PC & VG & VH & PK & VC & VD & PA & VJ & SK \end{matrix} \\ \begin{matrix} VA \\ VB \\ SC \\ VF \\ VK \\ PH \\ VE \\ PC \\ VG \\ VH \\ PK \\ VC \\ VD \\ PA \\ VJ \\ SK \end{matrix} & \begin{pmatrix} -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 25 & -\infty & 18 & -\infty & -\infty \\ -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 23 & 41 & 16 & -\infty & -\infty \\ -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 21 & -\infty & 13 & -\infty & -\infty \\ 9 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 20 & -\infty \\ -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 46 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 21 & 16 \\ -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 47 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 18 & 23 \\ -\infty & 24 & 26 & -\infty & 9 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty \\ -\infty & 29 & 27 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty \\ -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 32 & 11 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty \\ -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 30 & 14 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty \\ -\infty & -\infty & -\infty & 37 & 31 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty \\ 56 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 34 & 14 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty \\ -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 11 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty \\ 57 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 38 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty \\ -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 26 & -\infty & 10 & -\infty & -\infty & \infty & -\infty & -\infty \\ -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & 24 & -\infty & 14 & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (426)$$

Vypočet hodnot vlastního čísla a vlastního vektoru

V software Scilab se nachází pro stanovení hodnoty vlastního čísla a vlastního vektoru příkaz $[l, v, d] = \text{maxplusmaxalgol}(A)$, přičemž prvek l reprezentuje vlastní číslo matice A , v reprezentuje vlastní vektor matice A a d reprezentuje přirozené číslo, které představuje délku kritického cyklu matice A .

Nyní budou uvedeny příkazy, kterými byly v software Scilab vypočteny hodnoty vlastního čísla a vlastního vektoru.

```
-->s=maxplusscg(A)
s = T
-->[l,v,d] = maxplusmaxalgol(A)
d = 2.
v = 1863, 1861, 1859, 1831.5, 1778, 1784, 1844.5, 1849.5, 1769.5, 1767.5, 1828, 1878.5,
1820, 1879.5, 1797.5, 1801.5
l = 40.5
```

Výpočet začátků zelených

Vypočtenému počtu zelených, které se po určité době opakují, byly přiřazeny konkrétní hodnoty. V software Scilab se nachází pro stanovení následných začátků zelených v rámci vlastního čísla příkaz $[X] = \text{maxplussys}(A, x0, p)$, přičemž prvek A reprezentuje matici A , $x0$ reprezentuje počáteční vektor a p reprezentuje vlastní číslo.

Nyní budou uvedeny příkazy, kterými byly v software Scilab definovány začátky zelených.

```

-->x0=[1863; 1861; 1859; 1832; 1778; 1784; 1845; 1850; 1770; 1768; 1828; 1879; 1820;
1880; 1798; 1802];
-->p=41;
-->[X]=maxplussys(A,x0,p)

```

Zjištěné začátky zelených přepsané do časových údajů (tab. č. 7) nabízejí řešiteli pouze výchozí řešení, při kterém jsou do křižovatek umožněny současné vjezdy všem dopravním proudům. Proto byly začátky zelených, které přísluší jednotlivým fázím v tab. č. 7 ponechány, a začátky zelených, které jednotlivým fázím nepřísluší, byly v tab. č. 7 zastíněny.

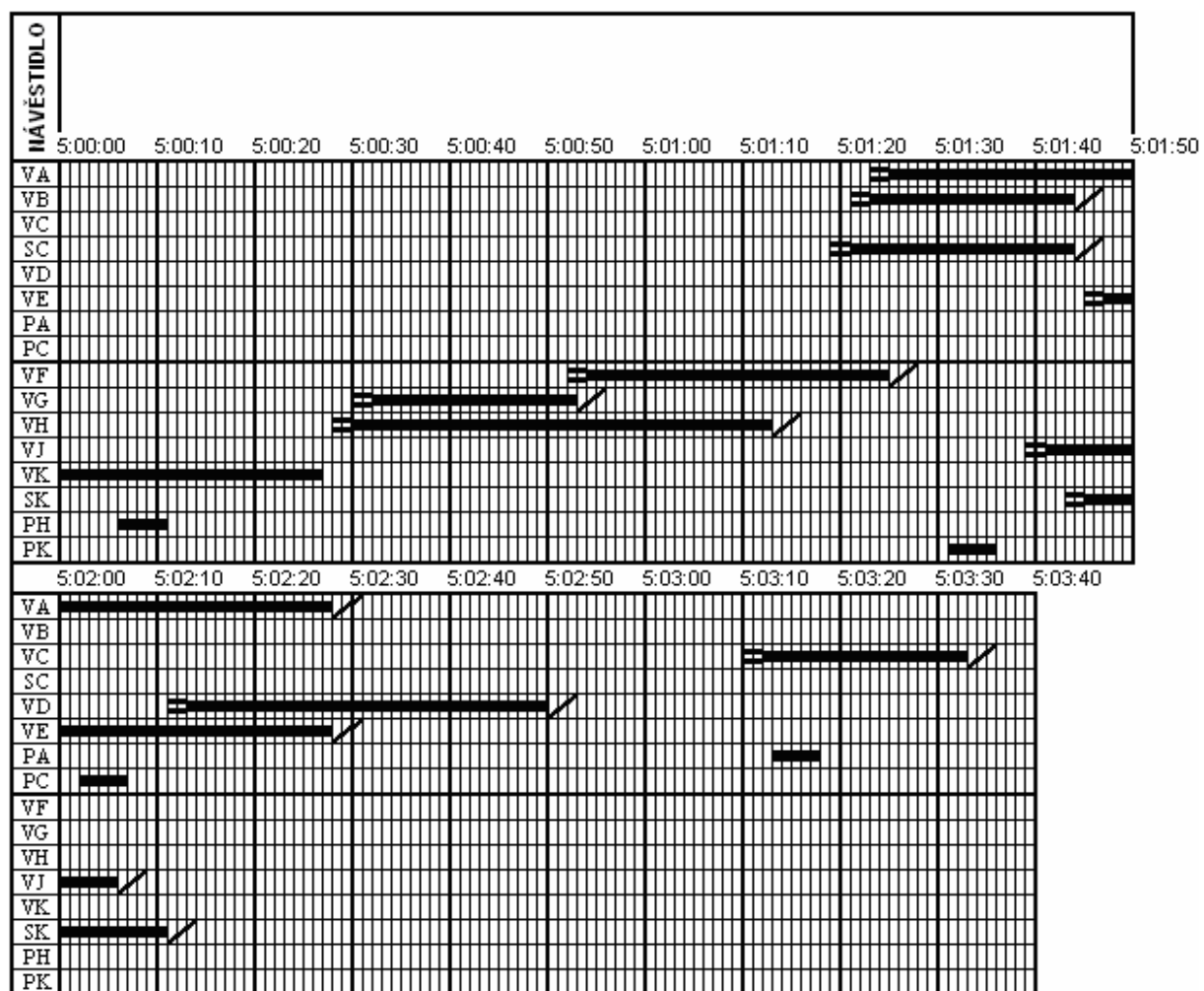
Tab. č. 7: Vypočtené začátky zelených

Začátky zelených v jednotlivých fázích									
VA	5:31:03	5:31:44	5:32:24	5:33:05	5:33:45	5:34:26	5:35:06	5:35:47	5:36:27
VB	5:31:01	5:31:42	5:32:22	5:33:03	5:33:43	5:34:24	5:35:04	5:35:45	5:36:25
SC	5:30:59	5:31:40	5:32:20	5:33:01	5:33:41	5:34:22	5:35:02	5:35:43	5:36:23
VF	5:30:32	5:31:12	5:32:20	5:32:33	5:33:14	5:33:54	5:34:35	5:35:15	5:35:56
VK	5:29:38	5:30:19	5:31:53	5:31:40	5:32:30	5:33:01	5:33:41	5:34:22	5:35:02
PH	5:29:44	5:30:25	5:31:05	5:31:46	5:32:26	5:33:07	5:33:47	5:34:28	5:35:08
VE	5:30:45	5:31:25	5:32:06	5:32:46	5:33:27	5:34:07	5:34:48	5:35:28	5:36:09
PC	5:30:50	5:31:30	5:32:11	5:32:51	5:33:32	5:34:12	5:34:53	5:35:33	5:36:14
VG	5:29:30	5:30:10	5:30:51	5:31:31	5:32:12	5:32:52	5:33:33	5:34:13	5:34:54
VH	5:29:28	5:30:08	5:30:49	5:31:29	5:32:10	5:32:50	5:33:31	5:34:11	5:34:52
PK	5:30:28	5:31:09	5:31:49	5:32:30	5:33:10	5:33:51	5:34:33	5:35:12	5:35:52
VC	5:31:19	5:31:59	5:32:40	5:33:20	5:34:01	5:34:41	5:35:23	5:36:12	5:36:43
VD	5:30:20	5:31:01	5:31:41	5:32:22	5:33:02	5:33:43	5:34:01	5:36:02	5:35:44
PA	5:31:20	5:32:00	5:32:41	5:33:21	5:34:02	5:34:42	5:35:05	5:36:04	5:36:44
VJ	5:29:58	5:30:38	5:31:19	5:31:59	5:32:40	5:33:20	5:34:09	5:34:03	5:35:22
SK	5:30:02	5:30:42	5:31:23	5:32:03	5:32:44	5:33:24	5:34:07	5:34:41	5:35:26
VA	5:37:08	5:37:48	5:38:29	5:39:09	5:39:50	5:40:30	5:41:11	5:41:51	5:42:32
VB	5:37:06	5:37:46	5:38:27	5:39:07	5:39:48	5:40:28	5:41:09	5:41:49	5:42:30
SC	5:37:04	5:37:44	5:38:25	5:39:09	5:39:46	5:40:26	5:41:07	5:41:47	5:42:28
VF	5:36:36	5:37:17	5:37:57	5:38:38	5:39:18	5:39:59	5:40:39	5:41:20	5:42:00
VK	5:35:43	5:36:23	5:37:04	5:37:44	5:38:25	5:39:05	5:39:46	5:40:26	5:41:07
PH	5:35:49	5:36:29	5:37:10	5:37:50	5:38:31	5:39:11	5:39:52	5:40:32	5:41:13
VE	5:36:49	5:37:30	5:38:10	5:38:51	5:39:31	5:40:12	5:40:52	5:41:33	5:42:13
PC	5:36:54	5:37:35	5:38:15	5:38:56	5:39:36	5:40:17	5:40:57	5:41:38	5:42:18
VG	5:35:34	5:36:15	5:36:55	5:37:36	5:38:16	5:38:57	5:39:37	5:40:18	5:40:58
VH	5:35:32	5:36:13	5:36:53	5:37:34	5:38:14	5:38:55	5:39:35	5:40:16	5:40:56
PK	5:36:33	5:37:13	5:37:54	5:38:34	5:39:15	5:39:55	5:40:36	5:41:16	5:41:57
VC	5:37:23	5:38:04	5:38:44	5:39:25	5:40:05	5:40:46	5:41:26	5:42:07	5:42:47
VD	5:36:25	5:37:05	5:37:46	5:38:26	5:39:07	5:39:47	5:40:28	5:41:08	5:41:49
PA	5:37:24	5:38:05	5:38:45	5:39:26	5:40:06	5:40:47	5:41:27	5:42:08	5:42:48
VJ	5:36:02	5:36:43	5:37:23	5:38:04	5:38:44	5:39:25	5:40:05	5:40:46	5:41:26
SK	5:30:06	5:36:47	5:37:46	5:38:08	5:38:48	5:39:29	5:40:09	5:40:50	5:41:30

VA	5:43:12	5:43:53	5:44:33	5:45:14	5:45:54	5:46:35	5:47:15	5:47:56	5:48:36
VB	5:43:10	5:43:51	5:44:31	5:45:12	5:45:52	5:46:33	5:47:13	5:47:54	5:48:34
SC	5:43:08	5:43:49	5:44:29	5:45:10	5:45:50	5:46:31	5:47:11	5:47:52	5:48:32
VF	5:42:41	5:43:21	5:44:02	5:44:42	5:45:23	5:46:03	5:46:44	5:47:24	5:48:05
VK	5:41:47	5:42:28	5:43:08	5:43:49	5:44:29	5:45:10	5:45:50	5:46:31	5:47:11
PH	5:41:53	5:42:34	5:43:14	5:43:55	5:44:35	5:45:16	5:45:56	5:46:37	5:47:17
VE	5:42:54	5:43:34	5:44:15	5:44:55	5:45:36	5:46:16	5:46:57	5:47:37	5:48:18
PC	5:42:59	5:43:39	5:44:20	5:45:00	5:45:41	5:46:21	5:47:02	5:47:42	5:48:23
VG	5:41:39	5:42:19	5:43:00	5:43:40	5:44:21	5:45:01	5:45:42	5:46:22	5:47:03
VH	5:41:37	5:42:17	5:42:58	5:43:38	5:44:19	5:44:59	5:45:40	5:46:20	5:47:01
PK	5:42:37	5:43:18	5:43:58	5:44:39	5:45:19	5:46:00	5:46:40	5:47:21	5:48:01
VC	5:43:28	5:44:08	5:44:49	5:45:29	5:46:10	5:46:50	5:47:31	5:48:11	5:48:52
VD	5:42:29	5:43:10	5:43:50	5:44:31	5:45:11	5:45:52	5:46:32	5:47:13	5:47:53
PA	5:43:29	5:44:09	5:44:50	5:45:30	5:46:11	5:46:51	5:47:32	5:48:12	5:48:53
VJ	5:42:07	5:42:47	5:43:28	5:44:08	5:44:49	5:45:29	5:46:10	5:46:50	5:47:31
SK	5:42:11	5:42:51	5:43:32	5:44:12	5:44:53	5:45:33	5:46:14	5:46:54	5:47:35
VA	5:49:17	5:49:57	5:50:38	5:51:18	5:51:59	5:52:39	5:53:20	5:54:00	5:54:41
VB	5:49:15	5:49:55	5:50:36	5:51:16	5:51:57	5:52:37	5:53:18	5:53:58	5:54:39
SC	5:49:13	5:49:53	5:50:34	5:51:14	5:51:55	5:52:35	5:53:16	5:53:56	5:54:37
VF	5:48:45	5:49:26	5:50:06	5:50:47	5:51:27	5:52:08	5:52:48	5:53:29	5:54:09
VK	5:47:52	5:48:32	5:49:13	5:49:53	5:50:34	5:51:14	5:51:55	5:52:35	5:53:16
PH	5:47:58	5:48:38	5:49:19	5:49:59	5:50:40	5:51:20	5:52:01	5:53:41	5:53:22
VE	5:48:58	5:49:39	5:50:19	5:51:00	5:51:40	5:52:21	5:53:01	5:53:42	5:54:22
PC	5:49:03	5:49:44	5:50:24	5:51:05	5:51:45	5:52:26	5:53:06	5:53:47	5:54:27
VG	5:47:43	5:48:24	5:49:04	5:49:45	5:50:25	5:51:06	5:51:46	5:52:27	5:53:07
VH	5:47:41	5:48:22	5:49:02	5:49:43	5:50:23	5:51:04	5:51:44	5:52:25	5:53:05
PK	5:48:42	5:49:22	5:50:03	5:50:43	5:51:24	5:52:04	5:52:45	5:53:25	5:54:06
VC	5:49:32	5:50:13	5:50:53	5:52:34	5:52:14	5:52:55	5:53:35	5:54:16	5:54:56
VD	5:48:34	5:49:14	5:49:55	5:50:35	5:51:16	5:51:56	5:52:37	5:53:17	5:53:58
PA	5:48:33	5:50:14	5:50:54	5:51:35	5:52:15	5:52:34	5:53:36	5:54:17	5:54:57
VJ	5:48:11	5:48:52	5:49:32	5:50:13	5:50:53	5:51:34	5:52:14	5:52:55	5:53:35
SK	5:48:15	5:48:56	5:49:36	5:50:17	5:50:57	5:51:38	5:52:18	5:52:59	5:53:39

VA	5:55:21	5:56:02	5:56:42	5:57:23	5:58:03	5:58:44
VB	5:55:19	5:56:00	5:56:40	5:57:21	5:58:01	5:58:42
SC	5:55:17	5:55:58	5:56:38	5:57:19	5:57:59	5:58:40
VF	5:54:50	5:55:30	5:56:11	5:56:51	5:57:32	5:58:12
VK	5:53:56	5:54:37	5:55:17	5:55:58	5:56:38	5:57:19
PH	5:54:02	5:54:43	5:55:23	5:56:04	5:56:44	5:57:25
VE	5:55:03	5:55:43	5:56:24	5:57:04	5:57:45	5:58:25
PC	5:55:08	5:55:48	5:56:29	5:57:09	5:57:50	5:58:30
VG	5:53:48	5:54:28	5:55:09	5:55:49	5:56:30	5:57:10
VH	5:53:46	5:54:26	5:55:07	5:55:47	5:56:28	5:57:08
PK	5:54:46	5:55:27	5:56:07	5:56:48	5:57:28	5:58:09
VC	5:55:37	5:56:17	5:56:58	5:57:38	5:58:19	5:58:59
VD	5:54:38	5:55:19	5:55:59	5:56:40	5:57:20	5:58:01
PA	5:55:38	5:56:18	5:56:59	5:57:39	5:58:20	5:59:00
VJ	5:54:16	5:54:56	5:55:37	5:56:17	5:56:58	5:57:38
SK	5:54:20	5:55:00	5:55:41	5:56:21	5:57:02	5:57:38

Na základě definovaných začátků zelených byly sestaveny signální plány (obr. č. 65).



Obr. č. 65: Signální plány pro koordinované křižovatky

8. POUŽITÉ SOFTWARE NÁSTROJE

Pro zpracování počítačových experimentů byly využity softwarové nástroje Snoopy, Pipe2 a Scilab.

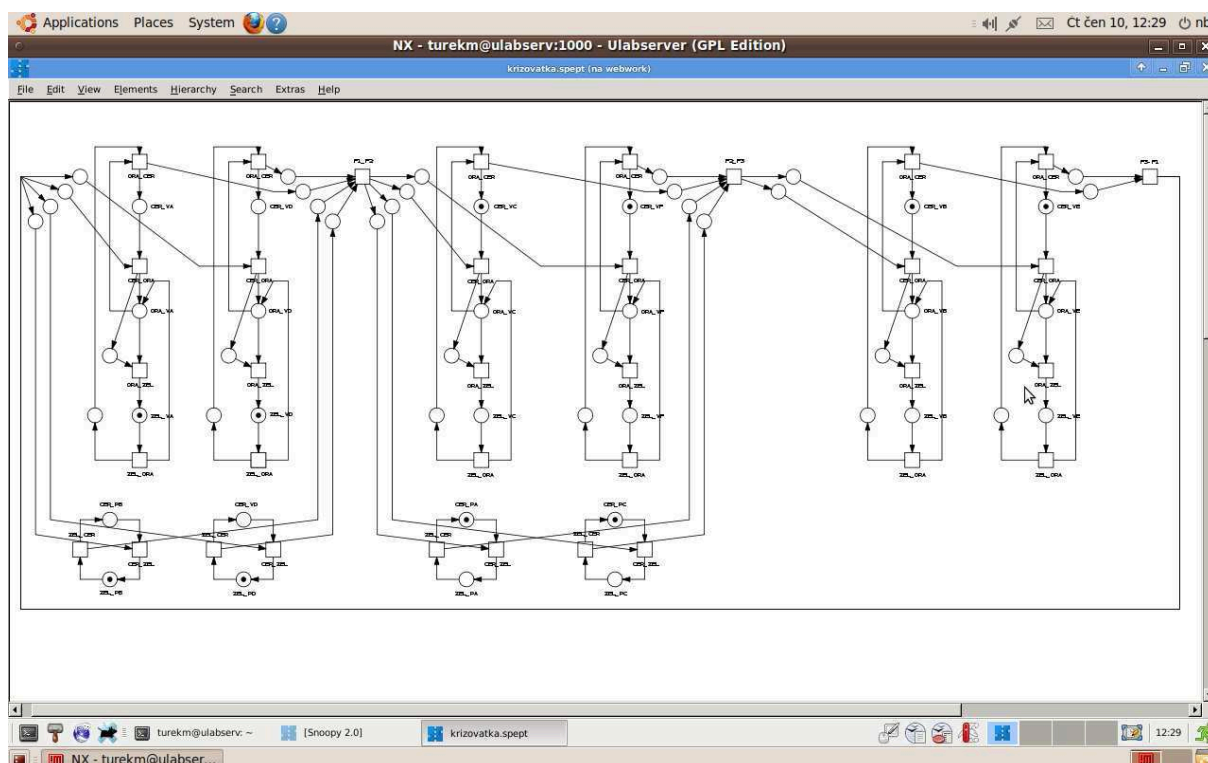
8.1 Software pro sestavení Petriho sítí

Při návrhu světelného řízení byl využit pro sestavení a simulaci Petriho sítě software Snoopy [19] a Pipe2 [17]. V následující části bude provedeno seznámení s uvedenými software.

8.1.1 Software Snoopy

Při spuštění software se zadává v nabídce *Templates* (šablony) typ Petriho sítě, se kterou bude dále pracováno. Po zadání typu Petriho sítě se kromě základní obrazovky umožňující práci se souborem zobrazí také obrazovka umožňující sestavení Petriho sítě prostřednictvím přehledného menu a pracovní plochy. Výběrem příslušné položky z menu se sestavují jednotlivé prvky Petriho sítě na pracovní plochu, přičemž u každého místa je možné definovat *Name* (název), *Marking* (značení), *Comment* (komentář) a *Graphic* (grafickou podobu), u každého přechodu je možné definovat *Name* (název), *Comment* (komentář) a *Graphic* (grafickou podobu), pro každou hranu je možné definovat *Multiplicity* (násobnost), *Comment* (komentář) a *Graphic* (grafickou podobu). Po sestavení Petriho sítě se výběrem položky *Start Anim-mode* zadávají parametry simulace *Referesh* (obnovení), *Duration* (trvání) *Stepping* (posílení) a následně může dojít ke spuštění simulace. Simulace v software Snoopy je velmi přehledná, protože se tokeny přesouvání po jednotlivých hranách a jsou zvýrazněny červenou barvou.

Pro názornost bude nyní uvedeno pracovní prostředí software Snoopy (obr. č. 66).

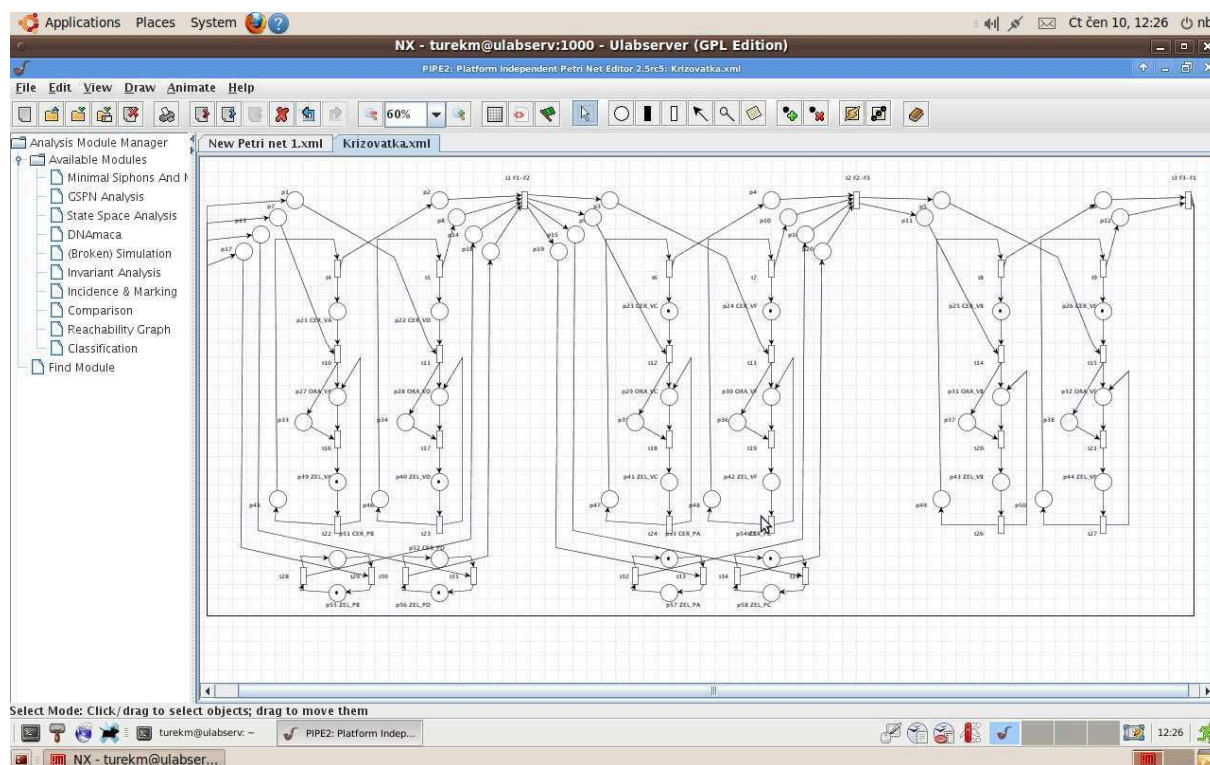


Obr. č. 66: Pracovní prostředí software Snoopy

8.1.2 Software Pipe 2

Při spuštění software se zobrazí menu a obrazovka rozdělená na dvě části, v jedné části se nachází *Analysis Module Manager* umožňující rozšířenou analýzu Petriho sítí a druhá část představující pracovní plochu, v níž se Petriho sítě sestavují. Výběrem příslušné položky z menu se sestavují odpovídající prvky Petriho sítě na pracovní plochu, přičemž u každého místa je možné definovat *Name* (název), *Marking* (značení), *Capacity* (kapacita), u každého přechodu je možné definovat *Name* (název), *Rate* (sazba) a *Timing* (časování), pro každou hranu je možné definovat *Multiplicity* (násobnost). Po sestavení Petriho sítě se definuje přechod, po němž dojde k ukončení simulace, a následně může dojít ke spuštění simulace. Při simulaci v software Pipe2 nedochází k přesunu tokenů po hranách, pouze se mění počty tokenů v jednotlivých místech, což snižuje přehlednost.

Pro názornost bude nyní uvedeno pracovní prostředí software Pipe2 (obr. č. 67).

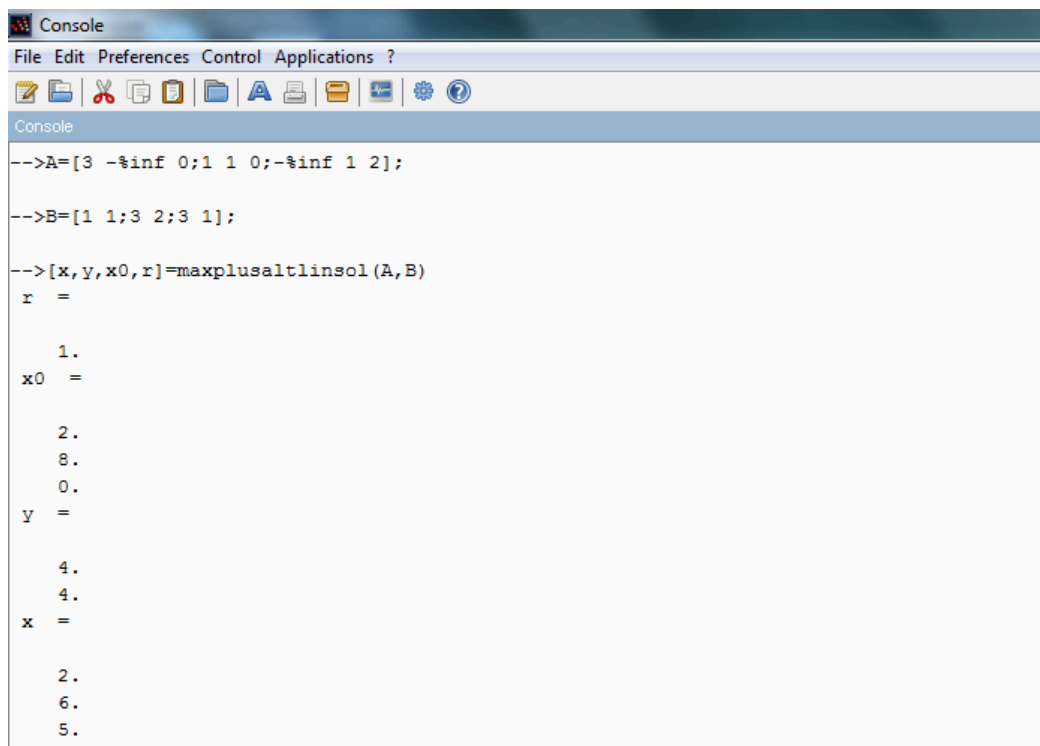


Obr. č. 67: Pracovní prostředí software Pipe2

8.2 Software pro max-plus algebru

Pro zpracování rovnic max-plus algebry byl francouzskými výzkumnými institucemi INRIA (The French National Institute for Research in Computer Science and Control) a ENPC (École Nationale des Ponts et Chaussées) vytvořen vědecký program pro numerické výpočty Scilab [18].

Při spuštění programu Scilab se zobrazí hlavní pracovní okno (obr. č. 68) obsahující menu, ikony a pracovní plochu. Menu a ikony slouží k obsluze vytvářených, resp. již vytvořených souborů v programu Scilab, nebo ke spuštění nápovědy, ve které jsou vysvětlovány jednotlivé příkazy na demonstračních příkladech. Pracovní plocha umožňuje řešit konkrétní příklady prostřednictvím příkazů, které se zadávají do dialogových řádků.



The image shows a screenshot of the Scilab software's Console window. The window has a title bar labeled 'Console' and a menu bar with 'File', 'Edit', 'Preferences', 'Control', 'Applications', and '?'. Below the menu bar is a toolbar with various icons for file operations and settings. The main area of the window is a text editor where the following code has been entered:

```
-->A=[3 -%inf 0;1 1 0;-%inf 1 2];  
  
-->B=[1 1;3 2;3 1];  
  
-->[x,y,x0,r]=maxplusaltlinsol(A,B)  
r =  
  
    1.  
x0 =  
  
    2.  
    8.  
    0.  
y =  
  
    4.  
    4.  
x =  
  
    2.  
    6.  
    5.
```

Obr. č. 68: Hlavní pracovní okno software Scilab

9. ZÁVĚR

Disertační práce se zabývá řízením provozu na silně závislých křižovatkách, v nichž je vstup dopravních proudů do jedné křižovatky bezprostředně ovlivňován výstupem dopravních proudů ze sousední křižovatky.

V první části disertační práce byly analyzovány přístupy k modelování závislých křižovatek. Jednalo se o přístupy uvedené v technických podmínkách TP 81, lineární programování a nekonvenční přístupy reprezentované Petriho sítěmi a max-plus algebrou. Pro názornost bylo také nastíněno použití jednotlivých přístupů na konkrétních příkladech.

V další části disertační práce byla v první fázi výzkumu navržena logika řízení světelných křižovatek Petriho sítěmi, která zajišťuje správnou posloupnost světelných signálů na návěstidlech světelného signalizačního zařízení. Navržená logika řízení světelných křižovatek umožňuje prostřednictvím postupného přiřazování zelené plynulý a především bezpečný provoz na izolovaných křižovatkách. Prvotní výzkum ukázal, že ve speciálních časově závislých lze výhodně využít matematický aparát max-plus algebry. Proto byly pro modelování koordinace silně závislých křižovatek navrženy tři max-plus modely ve třech variantách zajišťující plynulý a bezpečný provoz na koordinovaných křižovatkách.

Vytvořené max-plus modely koordinace křižovatek byly za účelem efektivnějšího způsobu řízení aplikovány na silně závislých křižovatkách severovýchodní části městského okruhu v Prostějově.

Práce ukázala, že problematiku koordinace křižovatek lze řešit kromě tradičního modelování pomocí matematického programování také netradičně pomocí matematického aparátu max-plus algebry, která patří mezi nelineární úlohy. Časově závislé Petriho sítě umožňují vizualizaci, kterou ocení dopravní inženýři při analýzách kritických událostí na křižovatkách zejména v období dopravních špiček. Navíc dávají reálné podněty pro rozvoj nových max-plus modelů pro koordinaci silně závislých křižovatek.

CONCLUSION

This thesis deals with traffic management at intersections are heavily dependent, where the input traffic streams into one intersection directly influenced by the output currents from the adjacent road junction.

In the first part of the thesis were analyzed approaches to modeling dependent junctions. It was the approaches outlined in the technical conditions TP 81, linear programming and unconventional approaches represented by Petri nets and max-plus algebra. For clarity, it also outlined the various approaches to the use of concrete examples.

In another part of the thesis was in the first phase of the research proposed traffic lights control logic Petri nets, which ensures the correct sequence of light signals to light signs. The proposed control logic allows the traffic lights by continuously matching green and smooth above the safe operation at isolated intersections. Initial research has shown that in special time-dependent can be advantageously used mathematical apparatus max-plus algebra. Therefore, for modeling coordination junctions depend strongly suggest three max-plus models in three variants to ensure smooth and safe operation of the coordinated intersections.

Generated max-plus models of coordination intersections were effective for the management applied to heavily dependent junctions in the, northeast of the city circuit in Prostejov.

Work has shown that coordination problems can be solved in addition to the intersections of traditional modeling using mathematical programming also using unconventional mathematical max-plus algebra, which is one of nonlinear problems. Time-dependent Petri nets allow visualization, traffic engineers will appreciate that the analysis of critical events at intersections especially during rush hours In addition, give a real impetus for the development of new max-plus models to coordinate strongly dependent junctions.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ANDERSEN, M. H. *Max-plus algebra: properties and applications*. 2002. Dostupné z <http://www.teachingcollegemath.com/files/pdf/max_plus_algebras_thesis_2002.pdf>
- [2] ANDRADE C. *Controle de sistemas Max-plus lineares sujeitos a restricoes no estado: Aplicacao a sistemas de transporte*. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. Dostupné z <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/1843/BUOS-8CREUE/1/c_ntia_ribeiro_andrade.pdf>
- [3] BACELLI F., COHEN G., OLSDER G. J., QUADRAT J. P. *Synchronization and Linearity*. 2001. Dostupné z <<http://www-rocq.inria.fr/metalau/cohen/documents/BCOQ-book.pdf>>
- [4] BURKARD R. E., BUTKOVIČ P. *Max algebra and the linear assignment problem*. 2003. Dostupné z <http://web.mat.bham.ac.uk/P.Butkovic/My%20papers/Max%20and%20AP.pdf>>
- [5] CECHLÁROVÁ, K. *Eigenvectors of interval matrices over max-plus algebra, Discrete Applied Mathematics - Special issue: Max-algebra archive*. 2005. č. 1, s 2 - 15
- [6] ČERNÝ, J., ČERNÁ, A. *Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech*. Pardubice: Institut J. Pernera, 2004. 1. vydání, 150 s. ISBN 80-86530-15-9
- [7] ČERNÝ, J., KLUVÁNEK, P. *Základy matematickej teórie dopravy*. Bratislava: VEDA, 1991. 279 s. ISBN 80-224-0099-8
- [8] DOTOLI M.; FANTI M. P. *An urban traffic network model via Coloured Timed Petri Net*. Bari: Dipartimento di Elettrotecnica ed Elettronica, Politecnico di Bari, 2006. Dostupné z <http://www-dee.poliba.it/LabControlli/file_pdf/Wodes04>
- [9] FALTUS, V. *Aplikace Petriho sítě při modelování dynamického řízení křižovatek*. Automatizace [online], 2005. č. 2, s. 88 - 91. Dostupné z <<http://www.automatizace.cz/magazine.php?m=35>>. ISSN 0005-125X
- [10] HEIDERGOTT B., OLSDER G. J., VAN DER WOUDE J. *Max Plus at Work: Modeling and Analysis of Synchronizes Systems: A Course on Max-plus Applications*. Princeton: Princeton University Press, 2005. 226 s. ISBN 978-0691117638
- [11] KOCHANÍČKOVÁ, M. *Petriho sítě*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2008. (Učební texty) Dostupné z <http://phoenix.inf.upol.cz/esf/ucebni/petriho_site.pdf>
- [12] MARKL, J. *Petriho sítě I*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009. (Učební texty) Dostupné z <<http://www.cs.vsb.cz/markl/pn/index.html>>

- [13] *Technické podmínky TP 81. Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu.* Brno: CDV, Ministerstvo dopravy České republiky, 2006.
- [14] RUSEK, M. *Možnosti matematického modelování při tvorbě signálních plánů světelně řízených křižovatek*, Sborník příspěvků konference „Dopravní systémy 2009“, Pardubice, 2009, s. 115 - 123, ISBN 978 - 80 - 86530 - 63 - 5
- [15] TUREK, M. *Možné využití Petriho sítí při navrhování logiky řízení světelných křižovatek*, Sborník příspěvků konference „Úlohy diskrétní optimalizace v dopravní praxi 2010“, Pardubice, 2010, s. 172 - 182. ISBN 978-80-7395-297-6
- [16] TUREK, M. *Navrhování řízení světelných křižovatek Petriho sítěmi*, Sborník příspěvků konference „Otvorený softvér vo vzdelávaní, výskume a v IT riešeniach 2010“, Žilina, 2010, s. 193 - 203. ISBN 978-80-970457-0-8
- [17] *Pipe2*. Dostupné z <<http://pipe2.sourceforge.net>>
- [18] *Scilab*. Dostupné z <<http://www.scilab.org>>
- [19] *Snoopy*. Dostupné z <<http://www-dssz.informatik.tu-cottbus.de/index.html?/software/snoopy.html>>

SEZNAM VLASTNÍCH PRACÍ

- [1] TUREK, M. *Komparace výsledků metod stanovených pro návrh světelného řízení křižovatek*, Sborník příspěvků konference „Dopravní systémy 2009“, Pardubice, 2009, s. 143 - 156, ISBN 978 - 80 - 86530 - 63 - 5
- [2] TUREK, M. *Možné využití Petriho sítí při navrhování logiky řízení světelných křižovatek*, Sborník příspěvků konference „Úlohy diskrétní optimalizace v dopravní praxi 2010“, Pardubice, 2010, s. 172 - 182, ISBN 978-80-7395-297-6
- [3] TUREK, M. *Navrhování řízení světelných křižovatek Petriho sítěmi*, Sborník příspěvků konference „Otvorený softvér vo vzdelávaní, výskume a v IT riešeniach 2010“, Žilina, 2010, s.193 -203, ISBN 978-80-970457-0-8
- [4] TUREK, M. *Navrhování řízení světelných křižovatek Petriho sítěmi*, Sborník příspěvků konference „Optimální umístování obslužných středisek pomocí IP-solvrů“, Žilina, 2010
- [5] DORDA, M., TUREK, M., TUREK, R. *Synchronization of public transport lines in the Max-plus algebra*, Sborník příspěvků konference „TRANSCOM 2011“, Žilina, 2011, s. 25 - 28, ISBN 978-80-554-0369-4
- [6] TUREK, M. *Využití Scilabu při koordinaci světelných křižovatek*, Sborník příspěvků konference „Otvorený softvér vo vzdelávaní, výskume a v IT riešeniach 2011“, Žilina, 2011, s. 111 - 120, ISBN 978-80-970457-1-5
- [7] TUREK, M. *Příspěvek o možném využívání P/T Petriho sítí při navrhování světelného řízení křižovatek*, Perner's Contacts [online]. 2010, č. 3, s. 361 - 370. Dostupné z <http://pernerscontacts.upce.cz/19_2010/Turek_M.pdf> ISSN 1801-674X
- [8] TUREK, M., TUREK, R. *Modelování vybraných dopravních problémů s využitím Petriho sítí*, Posterus [online]. 2010, č. 12, s. 1 - 13. Dostupné z <<http://www.posterus.sk/?p=9547&output=pdf>> ISSN 1338-0087
- [9] DORDA, M., TRESLER, F., TUREK, M., TUREK R. *Modelling and Simulation of Finite Markov Multi-server Queueing System Subject to Breakdowns*, Sborník příspěvků konference „10. th International Conference Aplimat“, Bratislava, 2011, s. 1157 - 1166, ISBN 978-80-89313-51-8
- [10] TUREK, M. *Koordinace silně závislých křižovatek v Max-plus algebře*, Perner's Contacts [online]. 2011, č. 1, s. 374 - 384. Dostupné z <http://pernerscontacts.upce.cz/21_2011/Turekm.pdf> ISSN 1801-674X

- [11] TUREK, M., TUREK, R. *Solving selected traffic problems in the Max-plus algebra*, Journal of Information, Control and Management Systems. 2011, č. 1, s. 67 - 75. ISSN: 1336-1716
- [12] TUREK, M. *Využití Max-plus algebry při koordinaci 2 světelných křižovatek*, Perner's Contacts [online]. 2011, č. 4, s. 382 - 390. Dostupné z <http://pernerscontacts.upce.cz/23_2011/TurekM.pdf> ISSN 1801-674X
- [13] TUREK, M. *Zkušenosti s využitím Max-plus algebry při koordinaci činnosti kooperujících uzlů v logistických systémech*, Acta Logistica Moravica [online]. 2012, č. 1, s. 135 - 140. Dostupné z <http://web2.vslg.cz/fotogalerie/acta_logistica/2012/1-cislo/16-turek-m.pdf> ISSN 1804-8315
- [14] PEŠKO, Š., TUREK, M., TUREK R. *Max-plus Algebra at Road Transportation*, Sborník příspěvků konference „30. th International conference on Mathematical Methods in Economics“, Karviná, 2012 (zaslaný příspěvek)
- [15] PEŠKO, Š., TUREK, M. *Coordination of Strongly Dependent Light Crossroads Using Max-plus Algebra*, Sborník příspěvků konference „IV International Scientific Congerence Transport Problems“, Katovice - Šlemieň, 2012 (zaslaný příspěvek)

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. č. 1: Schéma koordinovaných křižovatek
- Obr. č. 2: Diagram dráha - čas
- Obr. č. 3: Signální plán pro koordinované křižovatky
- Obr. č. 4: Schéma koordinovaných křižovatek v Ostravě
- Obr. č. 5: Schéma řešené křižovatky v Bari (Itálie)
- Obr. č. 6: Schéma tří koordinovaných křižovatek
- Obr. č. 7: Elementární Petriho síť
- Obr. č. 8: Elementární Petriho síť s tokenem
- Obr. č. 9: Příklad změny stavu v P/T Petriho síti
- Obr. č. 10: Schéma vzorové křižovatky
- Obr. č. 11: Fázové schéma vzorové křižovatky
- Obr. č. 12: Návrh řídicí logiky světelné křižovatky v P/T Petriho síti
- Obr. č. 13: Změna světelného signálu zeleného světla
- Obr. č. 14: Změna světelného signálu červeného světla
- Obr. č. 15: Změna fází
- Obr. č. 16: Koordinované stykové křižovatky
- Obr. č. 17: První varianta koordinace stykových křižovatek
- Obr. č. 18: Fázové schéma pro křižovatku 1
- Obr. č. 19: Fázové schéma pro křižovatku 2
- Obr. č. 20: Komunikační graf pro první variantu koordinace stykových křižovatek
- Obr. č. 21: Druhá varianta koordinace stykových křižovatek
- Obr. č. 22: Fázové schéma pro křižovatku 1
- Obr. č. 23: Fázové schéma pro křižovatku 2
- Obr. č. 24: Komunikační graf pro druhou variantu koordinace stykových křižovatek
- Obr. č. 25: Třetí varianta koordinace stykových křižovatek
- Obr. č. 26: Fázové schéma pro křižovatku 1
- Obr. č. 27: Fázové schéma pro křižovatku 2
- Obr. č. 28: Komunikační graf pro třetí variantu koordinace stykových křižovatek
- Obr. č. 29: Koordinovaná styková a průsečná křižovatka
- Obr. č. 30: První varianta koordinace stykové a průsečné křižovatky
- Obr. č. 31: Fázové schéma pro křižovatku 1
- Obr. č. 32: Fázové schéma pro křižovatku 2

- Obr. č. 33: Komunikační graf pro první variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky
- Obr. č. 34: Druhá varianta koordinace stykové a průsečné křižovatky
- Obr. č. 35: Fázové schéma pro křižovatku 1
- Obr. č. 36: Fázové schéma pro křižovatku 2
- Obr. č. 37: Komunikační graf pro druhou variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky
- Obr. č. 38: Třetí varianta koordinace stykové a průsečné křižovatky
- Obr. č. 39: Fázové schéma pro křižovatku 1
- Obr. č. 40: Fázové schéma pro křižovatku 2
- Obr. č. 41: Komunikační graf pro třetí variantu koordinace stykové a průsečné křižovatky
- Obr. č. 42: Koordinované průsečné křižovatky
- Obr. č. 43: První varianta koordinace průsečných křižovatek
- Obr. č. 44: Fázové schéma pro křižovatku 1
- Obr. č. 45: Fázové schéma pro křižovatku 2
- Obr. č. 46: Komunikační graf pro první variantu koordinace průsečných křižovatek
- Obr. č. 47: Druhá varianta koordinace průsečných křižovatek
- Obr. č. 48: Fázové schéma pro křižovatku 1
- Obr. č. 49: Fázové schéma pro křižovatku 2
- Obr. č. 50: Komunikační graf pro druhou variantu koordinace průsečných křižovatek
- Obr. č. 51: Třetí varianta koordinace průsečných křižovatek
- Obr. č. 52: Fázové schéma pro křižovatku 1
- Obr. č. 53: Fázové schéma pro křižovatku 2
- Obr. č. 54: Komunikační graf pro třetí variantu koordinace průsečných křižovatek
- Obr. č. 55: Letecký pohled na koordinované křižovatky v severovýchodní části městského okruhu
- Obr. č. 56: Schéma soustavy křižovatek
- Obr. č. 57: Fázové schéma pro křižovatku Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova
- Obr. č. 58: Fázové schéma pro křižovatku Svatoplukova-Újezd
- Obr. č. 59: Fragment fázového schématu pro křižovatku Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova obsahující ukončení 3. fáze a začátek 1. fáze
- Obr. č. 60: Fragment fázového schématu pro křižovatku Svatoplukova-Újezd obsahující ukončení 3. fáze a začátek 1. fáze
- Obr. č. 61: Fragment fázového schématu pro křižovatku Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova obsahující ukončení 1. fáze a začátek 2. fáze

- Obr. č. 62: Fragment fázového schéma pro křižovatku Svatoplukova-Újezd obsahující ukončení 1. fáze a začátek 2. fáze
- Obr. č. 63: Fragment fázového schématu pro křižovatku Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova obsahující ukončení 2. fáze a začátek 3. fáze
- Obr. č. 64: Fragment fázového schéma pro křižovatku Svatoplukova-Újezd obsahující ukončení 2. fáze a začátek 3. fáze
- Obr. č. 65: Signální plány pro koordinované křižovatky
- Obr. č. 66: Pracovní prostředí software Snoopy
- Obr. č. 67: Pracovní prostředí software Pipe2
- Obr. č. 68: Hlavní pracovní okno software Scilab

SEZNAM TABULEK

- Tab. č. 1: Označování dopravních proudů
- Tab. č. 2: Prvky P/T Petriho sítě
- Tab. č. 3: Doby zelené na křižovatce Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova
- Tab. č. 4: Doby zelené na křižovatce Svatooplukova-Újezd
- Tab. č. 5: Matice mezičasů pro křižovatku Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova
- Tab. č. 6: Matice mezičasů pro křižovatku Svatooplukova-Újezd
- Tab. č. 7: Vypočtené začátky zelených

OBSAH

ANOTACE.....	2
ANNOTATION	2
Prohlášení studenta.....	3
OBSAH	3
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	3
1. ÚVOD	3
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	3
2.1 Cíle práce.....	3
2.2 Osnova práce	3
3. SOUČASNÝ STAV TVORBY SIGNÁLNÍCH PLÁNŮ.....	3
3.1 Přístupy uvedené v technických podmínkách TP 81	3
3.2 Model lineárního programování.....	3
3.2.1 Matematický model pro řízení dopravy na křižovatce.....	3
3.2.2 Matematický model pro koordinaci dvou křižovatek	3
3.3 Petriho sítě.....	3
3.4 Max-plus algebra.....	3
4. POTŘEBNÉ POJMY A TVRZENÍ	3
4.1 Základní pojmy při řízení světelných křižovatek.....	3
4.2 Petriho sítě.....	3
4.3 Max-plus algebra.....	3
5. LOGIKA ŘÍZENÍ SVĚTELNÝCH KŘÍŽOVATEK V PETRIHO SÍTÍCH.....	3
6. MODEL Y ZÁKLADNÍCH TYPŮ SILNĚ ZÁVISLÝCH KŘÍŽOVATEK	3
6.1 Parametry a proměnné.....	3
6.2 Modelování koordinace stykových křižovatek	3
6.2.1 První varianta koordinace.....	3
6.2.2 Druhá varianta koordinace	3
6.2.3 Třetí varianta koordinace	3
6.3 Modelování koordinace stykové a průsečné křižovatky	3
6.3.1 První varianta koordinace.....	3
6.3.2 Druhá varianta koordinace	3
6.3.3 Třetí varianta koordinace	3
6.4 Modelování koordinace průsečných křižovatek.....	3

6.4.1 První varianta koordinace.....	3
6.4.2 Druhá varianta koordinace	3
6.4.3 Třetí varianta koordinace	3
7. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ NA REÁLNÝCH DATECH	3
7.1 Parametry a proměnné.....	3
7.2 Koordinace křižovatek Vápenice-Olomoucká-Svatoplukova a Svatooplukova-Újezd	3
7.2.1 Analýza vstupních podkladů	3
7.2.2 Modelování koordinace křižovatek	3
8. POUŽITÉ SOFTWARE NÁSTROJE.....	3
8.1 Software pro sestavení Petriho sítí	3
8.1.1 Software Snoopy	3
8.1.2 Software Pipe 2	3
8.2 Software pro max-plus algebru	3
9. ZÁVĚR.....	3
CONCLUSION	3
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	3
SEZNAM VLASTNÍCH PRACÍ.....	3
SEZNAM OBRÁZKŮ	3
SEZNAM TABULEK.....	3